

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

С. Н. ВЕШЕНЕВСКИЙ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

ИЗДАНИЕ ШЕСТОЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1977

Вешеневский С. Н.

В 40 Характеристики двигателей в электроприводе.
Изд. 6-е, исправленное. М., «Энергия», 1977.

432 с. с ил.

В книге дается теория и практика расчета механических характеристик двигателей постоянного тока, асинхронных и синхронных в режимах пуска, торможения и регулирования частоты вращения. Значительное место уделено семействам универсальных статических и динамических характеристик для серии отечественных двигателей. Рассматриваются характеристики двигателей при контакторном управлении, дается расчет и выбор резисторов.

Пятое издание выпущено в 1967 г.

Шестое издание дополнено таблицами технических данных новых двигателей, а текст приведен в соответствие с действующими стандартами.

Книга предназначена для проектировщиков, наладчиков и эксплуатационников электроприводов; также может служить пособием для студентов.

30307-023
В 051(01)-77 118-77

6П2.1.081

В течение многих лет хорошим пособием по расчету характеристик электроприводов и выбору пускорегулирующих резисторов для проектировщиков, наладчиков и эксплуатационников является книга С. Н. Вешеневского «Расчет сопротивлений для электродвигателей» — первое издание, 1938 г.; «Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей» — второе и третье издания, 1954 г., 1955 г.; «Характеристики двигателей в электроприводе» — четвертое и пятое издания, 1966 и 1967 гг. Широко используется эта книга и студентами технических вузов при изучении курса электропривода.

Со времени последнего издания книги прошло около десяти лет. Книга стала библиографической редкостью, но не потеряла своего значения, хотя за прошедшие годы появились новые серии двигателей и типы резисторов. Столь продолжительную жизнь книги можно объяснить разумным сочетанием в ней теоретического уровня рассматриваемых вопросов с практической направленностью.

Настоящее издание книги дополнено материалами по двигателям новых серий. Технические данные двигателей и резисторов старых серий сохранены, так как они в большом количестве имеются в эксплуатации. Терминология приведена в соответствие с требованиями действующих ГОСТ, а обозначения единиц — с системой СИ. Исключена гл. 5 «Характеристики двигателей при тиристорном управлении», так как за прошедшие годы вышло много специальной литературы, посвященной этим вопросам.

Подготовка книги к переизданию выполнена сослуживцами автора — сотрудниками института «Тяжпромэлектропроект».

А. П. Ващенко

Если в начальной стадии развития электропривода технологи выдавали задание механикам для конструирования механизмов, а механики после окончания своей работы передавали задание электрикам для выбора двигателя и проектирования управления, то сейчас еще при зарождении нового объекта технолог, механик и электрик вместе решают, какими средствами лучше осуществить технологию производства. В результате такого творческого содружества созданы мощные блюминги производительностью до 8 млн. т в год, прокатные станы со скоростью листа 30 м/с и проволоки 45 м/с, высокопроизводительные экскаваторы, точные металлообрабатывающие станки и другие установки.

Можно привести большое количество примеров, когда одни и те же технологические условия осуществляются либо кинематикой механизма, либо электроприводом, либо сочетанием того и другого. Однако развитие техники неуклонно ведет к упрощению кинематики механизмов, сокращению применения механических тормозов и тяжелых редукторов, так как более гибкий, отзывчивый и надежный электропривод берет на себя выполнение всех сложных режимов ускорения и замедления, регулирования и согласования скоростей.

Естественная механическая характеристика двигателя есть лишь одна частная характеристика из бесчисленного множества искусственных, которые он может дать в статике и динамике. Нередко двигатели работают значительную часть времени на искусственных характеристиках. Хорошим примером является привод подъема у кранов постоянного тока с известной классической контакторной схемой, где двигатель последовательного возбуждения работает с механическими характеристиками двигателя параллельного и смешанного возбуждения и даже асинхронного с явно выраженным критическим моментом.

За обеспечение лучших характеристик для технологии постоянно соревнуются двигатели постоянного и переменного тока.

Двигатели постоянного тока способны дать все требуемые технологией характеристики, но они имеют коммутационные ограничения по максимальной частоте вращения, зависимой от мощности, и потому уже теперь начинают сдерживать развитие высокоскоростных непрерывных установок.

Двигатели переменного тока не имеют недостатков по максимальной частоте вращения и некоторые режимы обеспечивают даже лучше, чем двигателя постоянного тока. Так, асинхронные двигатели могут дать более эффективное динамическое торможение в одну ступень с небольшим начальным ударным моментом и позволяют получить плавный бесступенчатый пуск несложным способом. Известно также, что двигатели переменного тока обладают существенными экономическими достоинствами как более дешевые, надежные и не требующие дорогих с относительно низким к. п. д. преобразовательных установок. Благодаря этим преимуществам двигатели переменного тока получили широкое распространение в промышленности в тех многочисленных случаях, когда особенности двигателей постоянного тока не нужны или мало ощутимы. Недостатком двигателей переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока все еще является невозможность получения простыми средствами низких и повышенных устойчивых частот вращения.

Еще долго будут соревноваться двигатели постоянного и переменного тока в сложных электроприводах. Здесь необходимо заметить, что род тока в большей мере определяется не двигателями, а аппаратурой, которая формирует искусственные характеристики двигателей и делает их «покорными».

Система генератор — двигатель с электромашинными усилителями, получившая развитие в предыдущие десятилетия благодаря замечательным характеристикам, придаваемым двигателям, уже отмирает вместе с другими вращающимися преобразователями. Уходят в прошлое и такие ныне еще применяемые статические устройства, как ртутные выпрямители и силовые магнитные усилители.

Сейчас быстро осваиваются и внедряются наиболее перспективные тиристорные преобразователи, которые органически развиваются вместе с бесконтактным управле-

нием с помощью логических элементов и бесконтактных датчиков и командных аппаратов. Тиристоры заменяют не только управляемые преобразователи, но и контакторную аппаратуру в схемах управления двигателями.

В настоящее время ведутся большие исследовательские работы во всех технически передовых странах по созданию тиристорных преобразователей частоты для регулирования частоты вращения асинхронных и синхронных двигателей. Когда будут найдены экономически оправданные решения такого регулирования, двигатели постоянного тока уступят повсеместно двигателям переменного тока долго удерживаемые позиции в промышленности.

Сейчас же при современном уровне аппаратостроения рациональным для промышленных объектов является применение смешанной системы рода тока.

ОБЩИЕ ОСНОВЫ

1-1. ДИНАМИКА ПРИВОДА

Ниже приводятся некоторые положения и формулы, представляющие собой развитие теории динамики привода [Л.5]. Даются: классификация моментов, знаки моментов и формулы времени и пути при прямолинейном изменении ускоряющих и замедляющих моментов в зависимости от частоты вращения двигателя.

Эти положения и формулы нужны для расчета переходных процессов электроприводов, расчета пусковых, тормозных и регулирующих резисторов по условиям создания требуемых режимов работы приводов, расчета и проверки на нагрев двигателей и резисторов и определения выдержек времени реле ускорения и замедления.

1. СВОЙСТВА МОМЕНТОВ И ИХ НАПРАВЛЕНИЯ

При рассмотрении режимов работы привода удобно относить все моменты сил к валу двигателя.

Состояние привода зависит от действия вращающего момента двигателя $M_{дв}$ и статического момента M_c , определяемого нагрузкой механизма. Каждый из этих моментов может быть движущим и тормозящим. Например, вращение диска пилы или вентилятора: $M_{дв}$ — движущий, M_c — тормозящий; опускание краном груза при генераторном режиме двигателя: $M_{дв}$ — тормозящий, M_c — движущий; силовой спуск груза: оба момента движущие; электрическое торможение прокатного стана: оба момента тормозящие.

Очевидно динамика привода определяется действием результирующего момента от этих двух моментов, который назовем *динамическим*:

$$M_{дн} = M_{дв} + M_c. \quad (1-1)$$

В выражении (1-1) моменты являются алгебраическими величинами. Законы для знаков моментов даются ниже, после анализа свойств моментов.

Двигательный режим характеризуется тем, что вращение привода происходит в направлении момента двигателя, другими словами, в двигательном режиме момент двигателя направлен согласно вращению.

В генераторном режиме двигателя (динамическое, рекуперативное торможения, противовключение) момент двигателя направлен против вращения.

Статические моменты удобно разбить по характеру действия на две группы, которые назовем: 1) *реактивные* моменты M_p и 2) *потенциальные* моменты M_n . К первой группе относятся моменты от сил трения, резания и деформации неупругих тел. Эти моменты создаются силами реакций, противодействуют вращению. Поэтому реактивные статические моменты всегда направлены против вращения.

Ко второй группе относятся моменты от сил веса и деформаций упругих тел. Поднятие или опускание грузов, а также сжатие или растяжение пружин связано с изменением потенциальной энергии привода, потому и принят термин «потенциальный момент». Нетрудно убедиться, что при увеличении запаса потенциальной энергии (подъем груза, сжатие пружин и т. п.) потенциальный момент препятствует вращению, т. е. направлен против вращения двигателя; при уменьшении потенциальной энергии (опускание груза, разжатие пружин и т. п.) потенциальный момент является движущим, т. е. направлен согласно вращению двигателя.

В расчетах удобнее оперировать с полным статическим моментом:

$$M_c = M_p + M_n. \quad (1-2)$$

Свойство статического момента зависит от преобладания в нем реактивного или потенциального момента. Наибольшее распространение имеют приводы со статическим чисто реактивным моментом или с преобладанием реактивного момента; к ним относятся: главные приводы прокатных станов, рольганги, токарные и фрезерные станки, вентиляторы, насосы и др. Примеры приводов со статическим моментом с преобладанием потенциального момента дают крановые установки, неуравновешенные подъемные столы, шахтные подъемники, приводы подъема экскаваторов, лифты и др.

Будем считать в расчетах моменты, направленные согласно вращению, положительными, а против вращения — отрицательными. Для упрощения изложения будем называть это положение «правилом совпадения с вращением».

Частоту вращения будем считать в расчетах всегда положительной, в какую бы сторону ни вращался двигатель.

Из приведенного выше анализа свойств моментов вытекает:

Моменты двигателя в двигательном режиме положительны, так как направлены по вращению; в генераторном режиме — отрицательные, так как направлены против вращения.

Статические реактивные моменты всегда отрицательны, так как направлены всегда против вращения.

Статические потенциальные моменты при увеличении запаса потенциальной энергии (подъем груза, сжатие пружин) отрицательны; при уменьшении запаса потенциальной энергии (опускание груза, разжатие пружин) — положительны.

Здесь необходимо дать пояснения о связи знаков моментов по указанному правилу совпадения с вращением со знаками моментов, которые показываются на механических характеристиках двигателей и на графиках во времени. Различие заключается в том, что в первом случае знаки моментов определяются только по совпадению с вращением двигателя (плюс) или противонаправлению с ним (минус) независимо от того, в каком направлении вращается двигатель; во втором знаки моментов определяются относительно условного положительного направления вращения в пространстве, например подъем — плюс, опускание — минус, или «вперед» — плюс, «назад» — минус. Поэтому, естественно, мы можем говорить только о связи знаков моментов, но не о совпадении знаков.

В качестве примера применения знаков моментов и частот вращения на рис. 1-1 показаны кинематические схемы механизмов, механические характеристики двигателей и графики во времени для механизма с реактивным моментом (рис. 1-1, а) и механизма с потенциальным моментом (рис. 1-1, б).

На графиках в каждый момент времени независимо от начальных условий знаки моментов определялись по правилу совпадения с вращением и, как видно из этих граfi-

График во времени

The figure consists of two vertically aligned graphs sharing a common horizontal time axis t . The vertical axis is labeled Π, M .

Top Graph: The upper part shows the bending moment diagram with values 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. The lower part shows the shear force diagram with values 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. The bending moment diagram is labeled with $M_{дв}$ (positive) and $M_{сн}$ (negative). The shear force diagram is labeled with $M_{дн}$ (positive) and $M_{сн}$ (negative). The graphs are divided into sections by vertical lines at $t = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$.

Bottom Graph: The upper part shows the bending moment diagram with values 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. The lower part shows the shear force diagram with values 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. The bending moment diagram is labeled with $M_{дв}$ (positive) and $M_{сн}$ (negative). The shear force diagram is labeled with $M_{дн}$ (positive) and $M_{сн}$ (negative). The graphs are divided into sections by vertical lines at $t = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$.

Из рис. 1-1 мы видим, что с изменением направления вращения двигателя реактивный момент (рис. 1-1, а) меняет знак в пространстве, оставаясь все время отрицательным относительно направления частоты вращения, а потенциальный момент (рис. 1-1, б) сохраняет свой знак в пространстве (так как груз всегда тянет вниз), но меняет его относительно направления вращения.

Обращаем внимание, что в расчетах нужно обязательно соблюдать следующий порядок: вначале определять истинные направления моментов в пространстве и только после этого определять знаки моментов по правилу совпадения с вращением или другим способом.

Имеются, например, предложения считать знаки моментов в расчетах относительно условного направления вращения двигателя в пространстве. Эти правила неудобны тем, что требуют установления начальных условий (выбора положительного направления частоты вращения), которые нужно помнить и соблюдать. Но еще более неудобной является другая условность: при расчетах по формулам ускорение двигателя в обратном направлении вращения получается отрицательным, т. е. ускорение приходится рассматривать как замедление относительно положительного направления вращения.

Мы не считаем целесообразным обязательно проводить полную унификацию в вопросе о знаках моментов, но считаем желательным использовать все наиболее рациональное, а именно: в расчетах переходных процессов определять знаки моментов по правилу совпадения с вращением и частоты вращения считать всегда положительными; на механических характеристиках и графиках во времени продолжать применять привычное и удобное в этих случаях правило, т. е. считать знаки моментов, исходя из принимаемого условного положительного направления вращения. Как уже было пояснено на рис. 1-1, мы не получили при этом противоречий.

На графиках рис. 1-1 показаны еще и динамические моменты $M_{дн}$ со знаками в скобках.

Необходимо обратить внимание, что в технической литературе часто применяют термин «динамический момент» не для момента, вызывающего ускорение или замедление привода ($M_{дн} = M_{дв} + M_c$), а для равного ему и обратного по направлению момента инерционных масс $J \frac{d\omega}{dt}$, возникающего при изменении частоты вращения привода и противодействующего этому изменению частоты вращения. Другими словами, пользуются не причиной, а следствием. Такое понятие не является физическим.

3. ПРИЗНАКИ РЕЖИМОВ ПРИВОДА

По значениям и знакам моментов, действующих в приводе, можно предопределить его режим. Поскольку изменение частоты вращения может вызвать только динамиче-

ский момент, получим следующие признаки:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{дн}} = 0 & \text{ — постоянная частота вращения} \\ & \text{(включая покой);} \\ M_{\text{дн}} > 0 & \text{ — ускорение;} \\ M_{\text{дн}} < 0 & \text{ — замедление.} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

Эти признаки полностью согласуются с законом динамики (1-4).

Представление, что привод будет оставаться в покое, если момент двигателя меньше статического, справедливо лишь для частного случая реактивного статического момента. Очевидно, если статический момент потенциальный и момент двигателя меньше его, то будет происходить ускорение привода в сторону статического момента, причем или против направления момента двигателя (опускание груза в режиме противовключения), или согласно ему (силовой спуск груза).

Также представление, что при моменте двигателя, большем статического, привод ускоряется, а при меньшем — замедляется, справедливо только в частном случае, когда статический момент реактивный.

При потенциальном статическом моменте могут получиться обратные режимы; например, если при свободном опускании груза лебедкой включить двигатель на подъем, то вначале до изменения направления вращения при моменте двигателя, большем статического, будет происходить замедление, а не ускорение. Также, если двигатель лебедки включен на подъем, но его момент меньше статического от груза, то груз начнет опускаться и привод будет ускоряться, а не замедляться.

В заключение еще раз оговорим, что *понятие динамический момент нужно относить к приводу в целом*, представляя его как алгебраическую сумму моментов двигателя и статического.

4. ВРЕМЯ УСКОРЕНИЯ И ЗАМЕДЛЕНИЯ ПРИВОДА

Динамический момент вызывает изменение частоты вращения электропривода согласно закону

$$M_{\text{дн}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1-4)$$

Здесь J — момент инерции электропривода, кг·м²; ω — угловая частота вращения, рад/с*; t — время, с; $M_{дн}$ — динамический момент, Н·м.

Момент инерции J является мерой инерции тела при его вращении; он равен сумме произведений масс всех элементов тела на квадраты их расстояний от оси вращения.

В практических расчетах момент инерции определяют как

$$J = m\rho^2, \quad (1-5)$$

где m — масса всего тела, кг; ρ — радиус инерции, м.

Если всю массу тела сосредоточить в одной точке или распределить на ободе бесконечно малой толщины, то радиусом инерции ρ будет расстояние от оси вращения до этой точки или обода.

В технических расчетах часто применяли вместо момента инерции J маховой момент GD^2 , в котором G — вес, кгс, а D — диаметр инерции, м. Отсюда получим соотношение

$$GD^2 = m(2\rho)^2 = 4m\rho^2 = 4J. \quad (1-6)$$

Мы не видим каких-либо удобств, а следовательно, и оправданий, для того чтобы наряду с моментом инерции еще пользоваться маховым моментом, и потому полностью исключаем его из рассуждений и формул.

Что касается угловой частоты вращения, то мы будем пользоваться при выводах формул угловой скоростью ω (рад/с), но конечный результат — выражать через частоту вращения n (об/мин), т. е. через лучше «осязаемую» величину.

Согласно выражению (1-4) дифференциал времени равен:

$$dt = J \frac{d\omega}{M_{дн}}. \quad (1-7)$$

Время, потребное для конечного изменения угловой скорости от ω_x до ω_y , определится интегрированием

$$t_{xy} = J \int_{\omega_x}^{\omega_y} \frac{d\omega}{M_{дн}}. \quad (1-8)$$

* Радиан (рад) — угол между двумя радиусами круга, вырезающими на окружности дугу, длина которой равна радиусу.

Если в пределах угловых скоростей от ω_x до ω_y динамический момент остается постоянным, то из (1-8) время

$$t_{xy} = J \frac{\omega_y - \omega_x}{M_{дн}} \quad (1-9)$$

Заменим угловые скорости ω (рад/с) на частоты вращения n (об/мин).

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9,55} \quad (1-10)$$

После подстановки этого значения ω в (1-9) получим:

$$t_{xy} = \frac{J}{9,55} \frac{n_y - n_x}{M_{дн}} \quad (1-9')$$

или, если $M_{дн}$, n_x , n_y заданы относительно M_n и n_n ,

$$t_{xy} = \frac{J n_n}{9,55 M_n} \frac{n_{y*} - n_{x*}}{M_{дн*}} \quad (1-9'')$$

Для двигателей параллельного возбуждения постоянного тока или асинхронных в (1-9'') вместо частоты вращения n_n должна быть n_0 или n_c , т. е. частота вращения идеального холостого хода или синхронная.

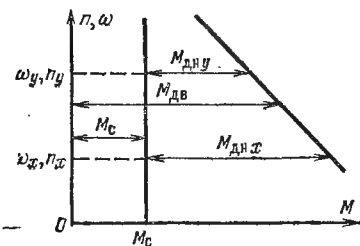


Рис. 1-2. Характеристики моментов статического M_c , двигателя $M_{дв}$ и динамического $M_{дн}$ в функции частоты вращения двигателя n при прямолинейном изменении динамического момента.

Найдем формулу для времени при изменении частоты вращения от n_x до n_y , если зависимость $M_{дн} = f(n)$ прямолинейна. На рис. 1-2 показано изменение абсолютных значений моментов двигателя и статического. Предположим, что они направлены друг против друга, тогда динамический момент определится как разность их абсолютных значений.

Зависимость $M_{дн} = f(\omega)$ можно выразить математически по двум точкам с координатами $(M_{днx}, \omega_x)$ и $(M_{днy}, \omega_y)$ и текущим координатам $M_{дн}$ и ω :

$$\frac{M_{дн} - M_{днx}}{M_{днy} - M_{днx}} = \frac{\omega - \omega_x}{\omega_y - \omega_x},$$

откуда

$$M_{дн} = \left(M_{днx} + \frac{M_{днx} - M_{днy}}{\omega_y - \omega_x} \omega_x \right) - \left(\frac{M_{днx} - M_{днy}}{\omega_y - \omega_x} \right) \omega. \quad (1-11)$$

Обозначая через a и b значения, взятые для наглядности соответственно в первые и вторые скобки, получаем:

$$M_{\text{дн}} = a - b\omega. \quad (1-11')$$

Время, потребное для изменения угловой скорости от ω_x до ω_y , равно:

$$t_{xy} = J \int_{\omega_x}^{\omega_y} \frac{d\omega}{a - b\omega} = J \frac{1}{b} \ln \frac{a - b\omega_x}{a - b\omega_y} = J \frac{2,3}{b} \lg \frac{a - b\omega_x}{a - b\omega_y}. \quad (1-12)$$

Подставляя в множитель $1/b$ величину b из равенства (1-11) и заменяя на основании (1-11') числитель $a - b\omega_x = M_{\text{дн}x}$ и знаменатель $a - b\omega_y = M_{\text{дн}y}$, получаем окончательно время изменения угловой скорости привода от ω_x до ω_y :

$$t_{xy} = 2,3J \frac{\omega_y - \omega_x}{M_{\text{дн}x} - M_{\text{дн}y}} \lg \frac{M_{\text{дн}x}}{M_{\text{дн}y}} \quad (1-13)$$

или выражая через n (об/мин), пользуясь (1-10):

$$t_{xy} = \frac{J}{4,15} \frac{n_y - n_x}{M_{\text{дн}x} - M_{\text{дн}y}} \lg \frac{M_{\text{дн}x}}{M_{\text{дн}y}}, \quad (1-13')$$

или, если $M_{\text{дн}x}$, $M_{\text{дн}y}$, n_x , n_y заданы относительно номинальных значений M_n и n_n ,

$$t_{xy} = \frac{J n_n}{4,15 M_n} \frac{n_{y*} - n_{x*}}{M_{\text{дн}x*} - M_{\text{дн}y*}} \lg \frac{M_{\text{дн}x*}}{M_{\text{дн}y*}}. \quad (1-13'')$$

И здесь для двигателей параллельного возбуждения постоянного тока и асинхронных вместо n_n должна быть n_0 или n_c . Выведенная нами формула справедлива как для ускорения, так и для замедления привода, если понимать моменты как алгебраические величины, а частоты вращения — как числовые абсолютные, т. е. считая, как было сказано выше, что в расчетах частота вращения (угловая скорость) принимается всегда положительной.

Формула (1-13) может иметь широкое применение для расчетов времени при различных переходных режимах двигателя, так как в большинстве практических случаев для сравнительно больших диапазонов частот вращения характеристики $M_{\text{дн}} = f(n)$ прямолинейны. В тех же случаях, когда эта характеристика непрямолинейна, можно разбить ее на отдельные небольшие прямолинейные участки.

Если динамический момент в рассматриваемом диапазоне изменения частоты вращения постоянен, необходимо

пользоваться (1-9), так как по (1-13) получается неопределенность.

Может показаться несколько непонятным, что выведенная для общего случая формула (1-13) оказывается непригодной к частному, когда динамический момент постоянен. Это становится ясным, если вернуться к (1-12), откуда следует, что если $b = 0$ (здесь $b = 0$ при $M_{\text{дн}x} = M_{\text{дн}y}$), то при решении интеграла мы не получим логарифмическую зависимость. Нетрудно видеть, что при $b=0$ выражение $a - b\omega$ равно $M_{\text{дн}x}$ [из равенства (1-11)], и, решая интеграл, получим выведенную ранее формулу (1-9) для случая $M_{\text{дн}} = \text{const}$.

5. ПУТЬ УСКОРЕНИЯ И ЗАМЕДЛЕНИЯ ПРИВОДА

Дифференциал пути $d\varphi$ в радианах за дифференциал времени dt в секундах равен:

$$d\varphi = \omega dt.$$

Из (1-4)

$$dt = J \frac{d\omega}{M_{\text{дн}}}.$$

Подставляя это выражение в первое равенство, получаем:

$$d\varphi = J \frac{\omega d\omega}{M_{\text{дн}}}.$$

Путь двигателя в радианах при изменении угловой скорости от ω_x до ω_y получим интегрированием

$$\varphi_{xy} = J \int_{\omega_x}^{\omega_y} \frac{\omega d\omega}{M_{\text{дн}}}. \quad (1-14)$$

Если динамический момент постоянен ($M_{\text{дн}} = \text{const}$), то

$$\varphi_{xy} = \frac{J}{2} \frac{\omega_y^2 - \omega_x^2}{M_{\text{дн}}}. \quad (1-15)$$

Путь двигателя в оборотах, выраженный через частоту вращения (об/мин), получим, заменив $\omega^2 = \frac{n^2}{9,55^2} = \frac{n^2}{91,2}$ согласно (1-10) и разделив еще на 2π , чтобы перевести радианы в обороты. В результате получим:

$$\varphi_{xy} = \frac{J}{1146} \frac{n_y^2 - n_x^2}{M_{\text{дн}}}. \quad (1-15')$$

Или, если $M_{дн}$, n_x , n_y даны относительно номинальных значений $M_{н}$ и $n_{н}$, то

$$\Phi_{xy} = \frac{J}{1146} \frac{n_{н}^2 (n_{y*})^2 - (n_{x*})^2}{M_{дн*}}. \quad (1-15'')$$

Зная время t_{xy} изменения частоты вращения от n_x до n_y , путь двигателя в оборотах можно определить проще:

$$\Phi_{xy} = \frac{n_x + n_y}{2} \frac{t_{xy}}{60} = \frac{n_x + n_y}{120} t_{xy}. \quad (1-16)$$

Для случаев, когда динамический момент не постоянен и изменяется по прямолинейному закону в функции времени, путь двигателя в радианах можно найти интегрированием (1-14), подставив значение $M_{дн}$ из (1-11'):

$$\begin{aligned} \Phi_{xy} &= J \int_{\omega_x}^{\omega_y} \frac{\omega d\omega}{a - b\omega} = J \left[\int_{\omega_x}^{\omega_y} \frac{a}{b} \frac{d\omega}{a - b\omega} - \int_{\omega_x}^{\omega_y} \frac{1}{b} d\omega \right] = \\ &= J \frac{1}{b} \left[\frac{a}{b} 2,3 \lg \frac{a - b\omega_x}{a - b\omega_y} - (\omega_y - \omega_x) \right]. \end{aligned}$$

Подставив в множители $\frac{a}{b}$ и $\frac{1}{b}$ значения a и b из (1-11) и преобразовав логарифмируемое выражение так же, как в (1-12), окончательно получим путь двигателя в радианах:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{xy} &= JC \left[(CM_{днx} + \omega_x) 2,3 \lg \frac{M_{днx}}{M_{дны}} - (\omega_y - \omega_x) \right], \\ \text{где} \quad C &= \frac{\omega_y - \omega_x}{M_{днx} - M_{дны}}. \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

Путь двигателя в оборотах, выраженный через частоту вращения (об/мин), получаем, пользуясь пояснениями, приведенными перед (1-15'), и учитывая, что после раскрытия величины C угловая скорость ω получится в квадрате:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{xy} &= \frac{J}{573} C \left[(CM_{днx} + n_x) 2,3 \lg \frac{M_{днx}}{M_{дны}} - (n_y - n_x) \right], \\ \text{где} \quad C &= \frac{n_y - n_x}{M_{днx} - M_{дны}}, \end{aligned} \right\} \quad (1-17')$$

или, если известны относительные значения $M_{дн х*}$, $M_{дн у*}$, $n_{х*}$, $n_{у*}$,

$$\varphi_{xy} = \frac{J}{573} \frac{n_H^2}{M_H} C' \left[(C' M_{дн х*} + n_{х*}) 2,3 \lg \frac{M_{дн х*}}{M_{дн у*}} \times \right. \\ \left. \times (n_{х*} - n_{у*}) \right], \quad (1-17'')$$

где

$$C' = \frac{n_{у*} - n_{х*}}{M_{дн х*} - M_{дн у*}}.$$

Здесь также вместо частоты вращения n_H может быть n_0 или n_c соответственно для двигателей параллельного возбуждения постоянного тока или асинхронных.

Пример 1-1. Двигатель ускоряет привод из состояния покоя до частоты вращения $n = 800$ об/мин, после чего совместно с механическим тормозом замедляет его опять до состояния покоя.

Определить времена и пути ускорения и замедления привода, если известно, что:

а) статический момент определяется силами трения и равен $M_c = 80$ Н·м;

б) момент инерции привода (двигателя, механизма и продукции), приведенный к валу двигателя, $J = 6,25$ кг·м²;

в) механический тормоз развивает момент $M_H = 280$ Н·м;

г) двигатель обладает прямыми механическими характеристиками согласно рис. 1-3.

Двигатель развивает следующие моменты:

а) при пуске $M_a = 500$ Н·м (точка а);

б) при достижении частоты вращения 800 об/мин $M_b = 100$ Н·м (точка б);

в) в первый момент торможения $M_d = 400$ Н·м (точка д).

Решение. Период ускорения. Вследствие того что статический момент определяется силами трения, он реактивный, а потому направлен против момента двигателя при трогании и против вращения, когда он вращается. При включении двигатель развивает момент 500 Н·м, тогда как статический момент равен 80 Н·м. Это вызовет ускорение привода, при этом статический момент остается постоянным, а момент двигателя падает. При частоте вращения 800 об/мин момент двигателя упадет до 100 Н·м, продолжая быть больше статического; если бы двигатель не был переключен на торможение, то ускорялся бы дальше, пока момент не был бы уравновешен статическим моментом.

В период ускорения момент двигателя положителен, так как он направлен в сторону вращения, а статический — отрицателен, так как он реактивный. Время ускорения от точки а до точки б определяется по (1-13'):

$$t_{ab} = \frac{J}{4,15 M_{дна} - M_{днб}} \lg \frac{M_{дна}}{M_{днб}}.$$

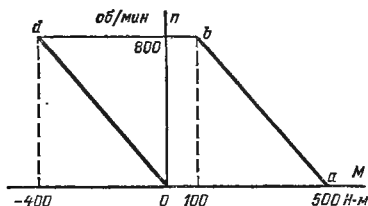


Рис. 1-3. Пусковая и тормозная характеристики двигателя (к примеру 1-1).

Здесь

$$M_{\text{дн}a} = + |M_a| - |M_c| = 500 - 80 = 420 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дн}b} = + |M_b| - |M_c| = 100 - 80 = 20 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Подстановкой получим:

$$t_{ab} = \frac{6,25}{4,15} \frac{800 - 0}{420 - 20} \lg \frac{420}{20} = 4 \text{ с.}$$

Определим путь двигателя при ускорении его от точки a до b . По формуле (1-17') имеем:

$$C = \frac{800 - 0}{420 - 20} = 2$$

и

$$\varphi_{ab} = \frac{6,25}{573} \cdot 2 \left[(2 \cdot 420 + 0) 2,3 \lg \frac{420}{20} - (800 - 0) \right] = 38 \text{ оборотов.}$$

Период замедления. При частоте вращения 800 об/мин двигатель переключается и изменяет направление момента, но, поскольку привод по инерции продолжает вращаться в ту же сторону, момент двигателя оказывается направленным против вращения. Против вращения будут направлены также момент сопротивления и момент от тормоза. Таким образом, все три момента направлены против вращения, благодаря чему привод станет замедляться. При этом моменты статический и тормоза остаются постоянными, а момент двигателя падает по прямой характеристике до нуля.

Время замедления привода определится по той же формуле, что и для ускорения, где

$$n_d = 800 \text{ об/мин}; \quad n_0 = 0;$$

$$M_{\text{дн}d} = -400 - 80 - 280 = -760 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дн}0} = -80 - 280 = -360 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Подстановкой в (1-13) получим:

$$t_{d0} = \frac{6,25 (0 - 800)}{4,15 [-760 - (-360)]} \lg \frac{-760}{-360} = \frac{6,25 \cdot 800}{4,15 \cdot 400} \lg \frac{760}{360} \approx 1 \text{ с.}$$

Определим путь по (1-17'):

$$C = \frac{0 - 800}{-760 - (-360)} = 2;$$

$$\varphi_{d0} = \frac{6,25}{573} \cdot 2 \left\{ [2 \cdot (-760) + 800] 2,3 \lg \frac{-760}{-360} - (0 - 800) \right\} = 5,8 \text{ оборота.}$$

Сравнивая найденные времена и пути, мы видим, что при замедлении время получилось в 4 раза, а путь в 6,5 раза меньше, чем при ускорении. Это объясняется тем, что при ускорении моменту двигателя противодействует статический момент, а при замедлении момент двигателя и статический момент направлены в одну сторону и к ним прибавляется еще момент от механического тормоза. Другими словами, при ускорении действует малый динамический момент, а при замедлении — большой.

При ускорении и замедлении двигателей могут возникнуть недопустимые по величине токи, если их не ограничить при помощи добавочных резисторов или обратных связей по току в замкнутой системе регулирования. Необходимость ограничения тока двигателей диктуется причинами электрического и механического характера.

1. ПРИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ОГРАНИЧЕНИЯ ПИКОВ ТОКА

Причины электрического характера ограничения тока двигателей могут быть следующие:

- 1) уменьшение толчков тока в сети;
- 2) уменьшение электродинамических усилий в обмотках двигателя;
- 3) получение удовлетворительной коммутации.

Уменьшение толчков тока в сети требуется обычно при пуске крупных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором или синхронных двигателей, если они получают питание от сравнительно маломощной питающей системы. Кроме того, для крупных двигателей заводы — изготовители машин не разрешают прямой пуск из-за чрезмерно больших электродинамических усилий в лобовых частях обмоток статора и ротора. Для ограничения тока применяются пусковые реакторы, резисторы и автотрансформаторы, расчет которых приведен в соответствующих разделах ниже.

Весьма сложной и еще недостаточно исследованной является теория ограничения тока по условиям коммутации. Рассмотрим вопрос о том, какие максимальные токи допускаются для двигателя постоянного тока при номинальной частоте вращения, при неподвижном якоре и при частотах вращения выше номинальной. Здесь необходимо отметить, что удовлетворительная коммутация является одним из основных условий хорошей работы двигателей постоянного тока, так как их надежность в эксплуатации в значительной степени зависит от состояния коллектора и щеток. Мелкие искорки, возникающие под щетками в виде отдельных огневых точек, сами по себе безвредны и не являются признаком неудовлетворительной коммутации. Неудовлетворительная коммутация характеризуется большими искрообразованиями, которые, выплавляя и испаряя медь,

создают углубления в коллекторных пластинах и быстро разрушают щетки.

ГОСТ 183-74 дает оценку коммутации по степени искрения под сбегающим краем щетки:

1. Степень искрения 1 — отсутствие искрения, почернения на коллекторе и нагара на щетках.

2. Степень искрения $1\frac{1}{4}$ — слабое искрение под небольшой частью щетки. При этом отсутствуют почернение на коллекторе и нагар на щетках.

3. Степень искрения $1\frac{1}{2}$ — слабое искрение под большей частью щетки. Появляются следы почернения на коллекторе, легко устранимые протиранием поверхности коллектора бензином, а также следы нагара на щетках.

4. Степень искрения 2 — искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки. Появляются следы почернения на коллекторе, не устранимые протиранием поверхности коллектора бензином, а также следы нагара на щетках.

5. Степень искрения 3 — значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы. Появляются значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток.

Рассмотрим причины электрического искрения под щетками:

В проводах секции якоря, переходящей из зоны одного главного полюса в зону другого полюса и кратковременно переключаемой щетками на коллекторе, ток меняет направление на противоположное. Одновременно в короткозамкнутой секции возникает добавочный внутренний ток, замыкающийся через щетки и не выходящий во внешнюю сеть, вызываемый результирующей э. д. с. e_p от возможных трех составляющих:

$$e_p = e_r - e_k \pm e_t. \quad (1-18)$$

Здесь: e_r — реактивная э. д. с. самоиндукции, вызываемая потоком рассеяния, сцепляющимся с витками секции. Она стремится поддержать существовавший ток в секции и потому приводит к запаздыванию изменения тока в секции. Поэтому при выходе коллекторной пластины из-под щетки

и размыкании замкнутой секции обрывается ток и выделяется электромагнитная энергия $Li^2/2$, образуя искрение. Эта э. д. с. пропорциональна частоте вращения и току якоря;

e_k — *коммутирующая* э. д. с., создается потоком добавочных полюсов в зоне коммутации такого направления, при котором она компенсирует реактивную э. д. с., ускоряя этим изменение тока в секции так, чтобы уменьшить ток в секции при размыкании. Эта э. д. с. также пропорциональна частоте вращения и току якоря, если считать добавочные полюсы ненасыщенными и индукцию под ними пропорциональной току добавочных полюсов.

Ввиду того что полярность добавочных полюсов меняется с изменением направления тока якоря, коммутирующая э. д. с. всегда направлена против реактивной э. д. с.;

e_t — *трансформаторная* э. д. с., индуцируется изменяющимся потоком главных полюсов и проявляется в двигателях последовательного и смешанного возбуждения, например, при ступенчатом пуске, когда быстро меняется ток в последовательной обмотке возбуждения главных полюсов, а также в двигателях параллельного возбуждения при управлении полем. Эта э. д. с. зависит от быстроты изменения потока главных полюсов и меняет направление в зависимости от того, убывает или возрастает поток.

В двигательном режиме машины e_t встречна e_r при возрастании потока и согласна ей при убывании потока; в генераторном же режиме наоборот. Поэтому трансформаторная э. д. с. будет ухудшать условия коммутации, помогая реактивной э. д. с. в двигательном режиме при убывании потока главных полюсов и в генераторном режиме — при возрастании потока.

Явления коммутации усложняются еще насыщением добавочных полюсов при больших токах, вследствие чего коммутирующая э. д. с. возрастает не пропорционально току якоря. Кроме того, в переходных режимах поток добавочных полюсов запаздывает по сравнению с током якоря вследствие образования вихревых токов в массивных частях магнитной системы.

На коммутацию вредно влияют также большие плотности тока под щетками и вибрация щеток на коллекторе при больших частотах вращения двигателя.

С некоторым допущением можно приближенно считать, что искрообразование будет одинаковым при любых частотах

тах вращения двигателя, если реактивная э. д. с., являющаяся основной в искрообразовании, постоянна, т. е.

$$e_r = cnI_{я} = \text{const},$$

или

$$nI_{я} = \text{const}. \tag{1-19}$$

К этому же закону приводит учет и коммутирующей э. д. с., так как она также пропорциональна частоте вращения и току якоря. Из (1-19) следует, что чем выше частота вращения якоря, тем меньшим должен быть ток, для того чтобы условия коммутации оставались одинаковыми.

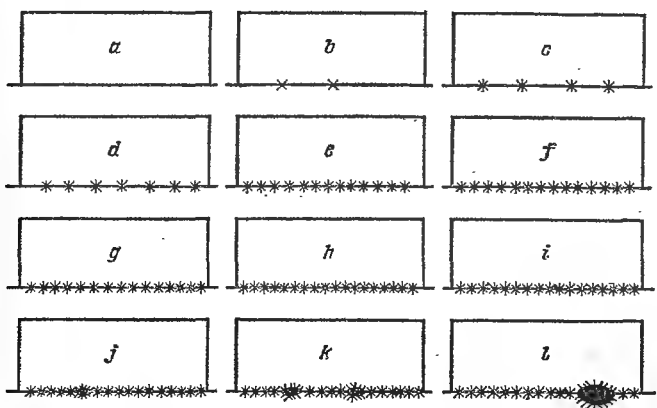


Рис. 1-4. Шкала коммутации для оценки искрения под щетками «на глаз».

Для оценки удовлетворительности коммутации применяется много различных методов, например снятие потенциальной диаграммы под щеткой, измерение напряжения на коллекторе под щеткой и ряд других. Все эти методы могут быть проведены только в лабораторных условиях и малопригодны для эксплуатационной практики.

Американская фирма *Дженерал Электрик* для определения степени удовлетворительности коммутации пользуется методом оценки «на глаз». Ею составлена специальная шкала коммутации (рис. 1-4), разбитая на 12 классов: а, в, с, ... , л, дающих изображения искр под щеткой для различных степеней искрения. Степень искрения двигателя определяется путем сравнения искрения под сбегающим краем положительной щетки с классами коммутации. Принята положительная щетка, а не отрицательная, потому что

она у двигателей сильнее искрит, так как для направления тока от угля к меди (положительная щетка двигателя) переходное напряжение меньше, чем для обратного направления.

Классу а соответствует безыскровая коммутация. Начиная с класса b и кончая f — коммутация искровая, но практически безвредная. Классы g — i могут допускаться не часто при мгновенных пиковых токах. Начиная с класса j получается накал щетки и возникновение маленьких дуг — эти классы коммутации недопустимы.

Заводом «Динамо» было проведено испытание на условия коммутации кранового двигателя последовательного возбуждения типа КП-1000/428, 80 кВт, 220 В, 550 А, 500 об/мин, ПВ = 25%, в режиме противовключения при различных частотах вращения и пиках тока.

Классы коммутации, которые получались при этом испытании, даны в табл. 1-1.

Таблица 1-1

Классы коммутации при различных частотах вращения и пиках тока в режиме противовключения для двигателей последовательного возбуждения КП-1000/428, 80 кВт, 220 В

№ п. п.	n_*	I_*	Класс коммутации по шкале (рис. 1-4)
1	1,0	1,31	c
2	1,0	1,75	d
3	1,6	1,67	e, f
4	1,6	2,10	g
5	1,6	2,36	g
6	2,0	1,25	e
7	2,0	1,91	g, h
8	2,0	2,25	h
9	2,0	2,82	i
10	2,5	1,18	f
11	2,5	1,76	g
12	2,5	2,25	i
13	2,5	2,84	j

Режимы 3, 6 и 10 хотя и значительно отличаются по частотам вращения и токам, но дают примерно одинаковые классы коммутации. Для этих режимов, как нетрудно подсчитать, произведения частоты вращения на ток соответ-

ственно равны: 2,68; 2,50; 2,94, т. е. они близки друг к другу, что и следовало ожидать согласно (1-19). Аналогичную картину мы получим и для других режимов, имеющих одинаковые классы коммутации.

Для серии МП краново-металлургических двигателей 220 В, ПВ = 25% завод-изготовитель указывал для степени искрения три следующих кратковременно допускаемых тока якоря в долях номинального:

3,6-кратный при малой частоте вращения (трогание с места);

3-кратный при номинальной частоте вращения;

1,5-кратный при повышении частоты вращения до двойной.

Примерно такие же токи допускают и краново-металлургические двигатели типа ДП.

Двигатели типа ПН, 220 В параллельного возбуждения, сконструированные для длительного режима работы, допускают по данным завода-изготовителя токи, 2—2,5-кратные номинальному, при частоте вращения от 0,2 до 2-кратной номинальной, вызывая искрение степени $1\frac{1}{2}$ —2.

Крупные двигатели постоянного тока параллельного возбуждения до 6000 кВт и выше, применяемые для прокатных станов, изготавливаются с максимальными допускаемыми токами якоря, 2,5-кратными номинальному при номинальной частоте вращения и ниже номинальной и примерно 2-кратными при двойной частоте вращения.

На рис. 1-5 дана ориентировочная диаграмма допускаемых пиков тока якоря для двигателей типов МП, ПН и крупных прокатных двигателей при искрении степени 2—3, основанная на указанных выше данных заводов — изготовителей машин. При частотах вращения $n_* = 0-1-2-4$ допускаемые пики тока приняты равными $I_{я*} = 2,5-2,5-2-1,6$. Изменение допускаемого тока между приведенными точками будем считать по прямой линии.

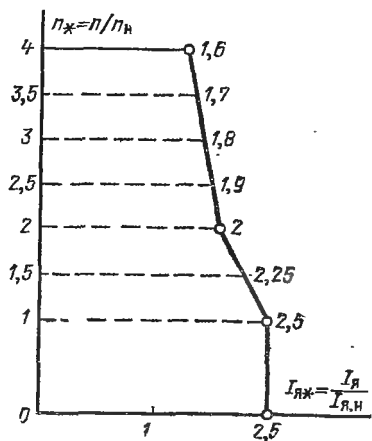


Рис. 1-5. Ориентировочная диаграмма допускаемых пиков тока якоря для двигателей постоянного тока.

Диаграмма не отражает точно закон $nI_a = \text{const}$. Так, например, если при 4-кратной частоте вращения двигатель допускает 1,6-кратный ток, то при номинальной частоте вращения он должен был бы по закону допускать ток $1,6 \times \times 4 = 6,4$ -кратный. Такой большой ток, однако, двигатель допускать не может, так как, кроме коммутации, имеются еще другие ограничивающие причины: подгорание коллектора и щеток, электродинамические усилия в обмотках якоря, прочность вала двигателя.

При повышении частоты вращения двигателя ослаблением потока возбуждения вступают в силу еще ограничения по допускаемому току из-за реакции якоря. Для определения максимальных токов, допускаемых двигателями по причинам электрического характера мы будем пользоваться диаграммой рис. 1-5. Однако в отдельных конкретных случаях необходимо соблюдать указания заводов-изготовителей двигателей, в частности приведенные выше данные для двигателей типов МП и ДП. В дальнейшем после проведения строго обоснованных научно-исследовательских работ возможно потребуются ввести коррективы в приведенную диаграмму.

2. ПРИЧИНЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ОГРАНИЧЕНИЯ ПИКОВ МОМЕНТА

Причины механического характера ограничения момента двигателей могут быть самыми разнообразными, например предотвращение:

- 1) поломки или быстрого изнашивания передач;
- 2) соскальзывания ремней со шкивов;
- 3) буксования колес подвижных тележек;
- 4) больших ускорений или замедлений, недопустимых для оборудования или людей в различных средствах передвижения, и т. д.

Механизмы могут иметь неисчислимое множество видов конструкций и значительно отличаться по своим требованиям в смысле моментов, а потому для них не представляется возможным дать обобщающих данных.

Остановимся на некоторых положениях, которые следует иметь в виду при выборе пиков момента двигателей.

Во всех случаях, где условия работы не требуют форсированных ускорений или замедлений, желательно рассчитывать режимы на минимальные пики тока, а следовательно, и момента, сохраняя этим передачи механизма, двигатель

и аппаратуру. К таким приводам могут быть отнесены редко пускаемые транспортеры, станки и другие механизмы.

Если требуются форсированные режимы ускорения и замедления, как, например, для рольгангов, манипуляторов, кантователей и большинства других часто пускаемых механизмов прокатных станков, которые, как правило, исполняются весьма прочной конструкции, пики момента выбираются по токам, допускаемым по условиям коммутации.

Наличие в неподвижном приводе зазоров между зубьями или слабины канатов, цепей и т. д. определяет очень маленький статический момент при включении двигателя в сеть и трогании его с места. Это вызывает быстрое ускорение двигателя, и когда будут выбраны все зазоры и все элементы механизма придут в соприкосновение, получится удар. Удары в передачах уменьшают срок службы механизмов, а иногда могут вызвать в зависимости от конструкции или поломку зубьев и деталей передач, или соскакивание ремней, или вытягивание и обрыв канатов, цепей и т. д. Исходя из этого, желательно при включении двигателя в сеть давать пониженные моменты или, как еще их называют, *предварительные моменты*, которые не ускоряли бы весь привод, а лишь приводили бы в соприкосновение и напряженное состояние все его элементы так, чтобы стык элементов механизма получался при низкой частоте вращения и низком моменте двигателя.

Предварительные моменты должны применяться непременно для таких приводов, как шахтные подъемники, лифты, ленты разливочных машин, некоторые конвейеры и т. д.

Для передвижных составов и тележек необходимо соблюдать условия нормального движения, заключающиеся в том, чтобы в каждый данный момент сила тяги или торможения была меньше силы сцепления:

$$F < \rho G, \quad (1-20)$$

так как в противном случае будет происходить буксование колес.

Здесь F — сила тяги или торможения, равная касательному усилию на ободе колеса, Н; G — сцепной вес, равный весу, приходящемуся на одно колесо, Н; ρ — коэффициент сцепления, зависящий от материала бандажей и рельсов, строения соприкасающихся поверхностей и их состояния.

Для средств передвижения людей величины ускорений и замедлений могут ограничиваться помимо условий буксования, если движение происходит при помощи катаю-

щихся колес, физиологическими причинами. Установлено также, что на организм человека еще в большей степени, чем ускорение и замедление, влияет изменение ускорения и замедления.

По требуемому ускорению определяется динамический момент, а затем по нему и статическому — момент двигателя.

Соображения и данные по выбору пиков момента ускорения и замедления приводов для конкретных случаев даются ниже в соответствующих разделах.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2-1. НОМИНАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

При расчете сопротивлений удобно пользоваться понятием «номинальное сопротивление». Это понятие дает возможность обобщать и упрощать расчеты, а также легко ориентироваться в них и представлять режимы двигателя при различных сопротивлениях его силовой цепи.

Для двигателей постоянного тока номинальным сопротивлением R_n называется такое сопротивление силовой цепи, состоящее из внутреннего и внешнего сопротивлений, которое при неподвижном якоре и номинальном для двигателя напряжении сети U_n определит номинальный ток в якоре $I_{я.н}$.

Данное определение относится ко всем двигателям постоянного тока: параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

На рис. 2-1 показана принципиальная схема включения в сеть двигателя смешанного возбуждения через внешнее последовательное сопротивление добавочного резистора. Пусть напряжение сети U равно номинальному для двигателя и сопротивление силовой цепи $r_d + r_v$ равно номинальному, тогда через якорь, когда он неподвижен, будет проходить номинальный ток. Из определения номинального сопротивления вытекает:

$$R_n = U_n / I_{я.н}. \quad (2-1)$$

Если двигатель исполнен для длительного режима работы, то за $I_{я.н}$ следует считать номинальный ток по каталогу для длительного режима. Если двигатель исполнен для повторно-кратковременного и кратковременного

режимов работы, то из трех токов, соответствующих относительным продолжительностям включения 15, 25 и 40%, принятым в СССР как стандарт, за $I_{я.н}$ следует считать номинальный ток для ПВ = 40%. Последнее оправдывается тем, что основные данные двигателей: допускаемые токи, допускаемые частоты вращения и т. п. — даются заводами в относительных значениях или процентах номинальных на базе ПВ = 40%.*

Для того чтобы лучше оттенить сущность сопротивлений различных цепей, введем обозначения: большие буквы R — для полных сопротивлений цепей двигателей, состоящих из внутренних и внешних; малые буквы r — для внутренних сопротивлений двигателей и отдельных секций добавочных резисторов.

В расчетах с относительными значениями номинальное сопротивление принимается за единицу. Любое относительное сопротивление r найдется из

$$r_* = r/R_{я.н} \quad (2-2)$$

Пример 2-1. Последовательно якорю двигателя включено внешнее сопротивление $r_{в*} = 2$ Ом (рис. 2-1). Определить относительное значение этого сопротивления, если известны для двигателя номинальное напряжение $U_{н} = 220$ В и номинальный ток $I_{я.н} = 55$ А:

$$R_{я} = \frac{U_{н}}{I_{я.н}} = \frac{220}{55} = 4 \text{ Ом.}$$

Внешнее сопротивление

$$r_{в*} = \frac{r_{в}}{R_{я}} = \frac{2}{4} = 0,5.$$

2-2. ВНУТРЕННИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Расчеты пусковых, тормозных и регулировочных характеристик и резисторов требуют знания внутренних сопротивлений двигателей. Выражая их в относительных значе-

* Для выпускавшихся ранее серий краново-металлургических двигателей номинальным повторно-кратковременным считалось ПВ = 25%, что видно из названий таблиц, приведенных в приложении. (Прим. ред.)

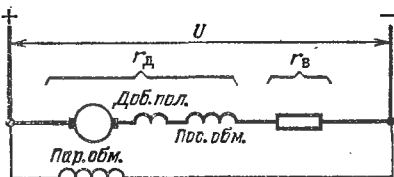


Рис. 2-1. Схема включения в сеть двигателя смешанного возбуждения через последовательный добавочный резистор.

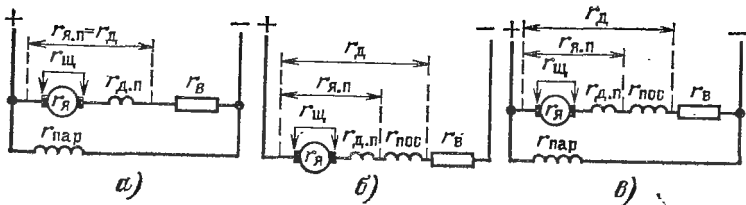


Рис. 2-2. Внутренние сопротивления двигателей постоянного тока.

а — параллельное возбуждение; б — последовательное возбуждение; в — смешанное возбуждение.

ниях, можно построить удобные для расчетов кривые зависимости внутренних сопротивлений от номинальных мощностей двигателей.

У двигателей постоянного тока внутренние сопротивления складываются из следующих составляющих: $r_{я}$, $r_{щ}$, $r_{д.п}$, $r_{пос}$ и $r_{пар}$ — соответственно сопротивления якоря, щеток, добавочных полюсов, последовательной обмотки возбуждения и параллельной обмотки возбуждения.

На рис. 2-2 показаны схемы включения в сеть двигателей параллельного, последовательного и смешанного возбуждения с обозначенными внутренними и внешними сопротивлениями.

Сопротивления $r_{я}$, $r_{щ}$ и $r_{д.п}$ для всех двигателей постоянного тока при любых практических схемах включения соединены последовательно и обтекаются одним током, поэтому в дальнейшем мы будем интересоваться только суммой этих сопротивлений, которую обозначим через

$$r_{я.п} = r_{я} + r_{щ} + r_{д.п} \quad (2-3)$$

и будем называть *полным сопротивлением якоря*:

Сопротивление щеток принято исходя из падения напряжения в них 2 В при номинальном токе двигателя. Для двигателей с номинальным напряжением 220 В это соответствует приблизительно относительному сопротивлению щеток $r_{щ*} = 0,01$. Хотя и известно, что с увеличением тока сопротивление щеток уменьшается, мы будем считать его постоянным, что приемлемо для практических расчетов.

На рис. 2-3 даны кривые зависимости относительных значений внутренних сопротивлений цепи якоря от номинальных мощностей для серии краново-металлургических двигателей типа МП параллельного, последовательного и

смешанного возбуждения и для единой серии двигателей длительного режима типа ПН параллельного возбуждения.

Мы видим, что с увеличением номинальных мощностей двигателей относительные значения их внутренних сопротивлений уменьшаются.

Для двигателей типа МП последовательного возбуждения сопротивление последовательной обмотки $r_{\text{пос}}$ составляет половину от сопротивления якоря $r_{\text{я.п}}$, а для двигателей смешанного возбуждения — $0,2 r_{\text{я.п}}$.

Сопротивление стабилизирующей обмотки $r_{\text{пос}}$ в двигателях параллельного возбуждения очень мало. Поэтому на рис. 2-3 для двигателя параллельного возбуждения типа ПН кривая r_d почти сливается с кривой $r_{\text{я.п}}$.

Для расчетов, связанных с регулированием поля двигателей параллельного и смешанного возбуждения, необходимо знать сопротивление параллельной обмотки. Сопротивления параллельных обмоток двигателей постоянного тока велики и составляют десятки и сотни ом.

В тех случаях, когда сопротивления параллельных обмоток неизвестны, их можно приближенно определить, пользуясь зависимостью потребляемых ими мощностей

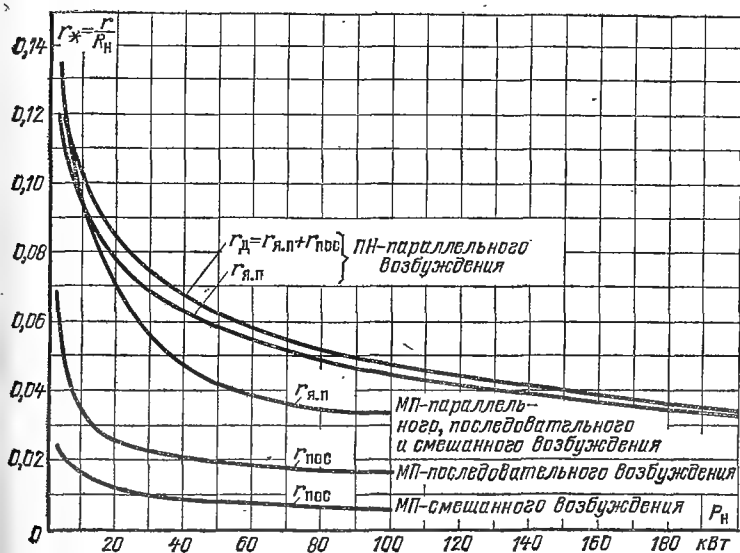


Рис. 2-3. Внутренние сопротивления цепи якоря двигателей типов МП и ПН (сопротивления приняты при температуре 60°C).

$P_{\text{пар}}$ при номинальном напряжении от номинальных мощностей двигателей $P_{\text{н}}$. Такие зависимости даны на рис. 2-4 для двигателей параллельного и смешанного возбуждения типа МП и параллельного возбуждения типа ПН.

Более мощные двигатели потребляют в параллельных обмотках еще меньшую относительную мощность; так, двигатели 1000—3000 кВт потребляют соответственно относительную мощность 0,008—0,003.

Двигатели с широкими пределами регулирования (1 : 3, 1 : 4) потребляют в параллельных обмотках повышенную

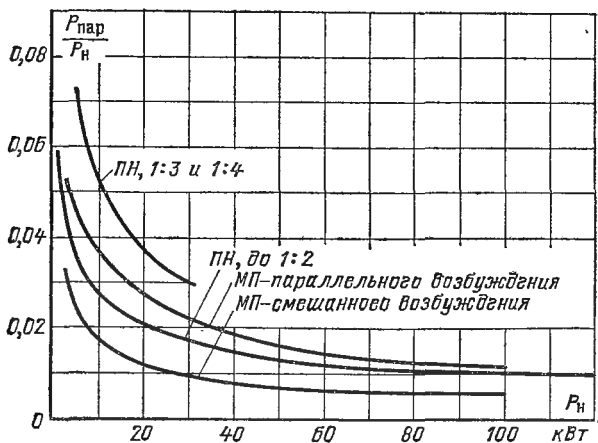


Рис. 2-4. Кривые относительных потерь мощности в параллельной обмотке возбуждения для двигателей типов МП и ПН при номинальном напряжении (сопротивления приняты при температуре 80°C).

относительную мощность, так как при тех же габаритах (тех же магнитных системах) они имеют меньшую номинальную мощность.

Очевидно, что двигатели смешанного возбуждения потребляют в параллельных обмотках меньшую мощность, чем двигатели параллельного возбуждения.

На рис. 2-3 и 2-4 сопротивления цепи якоря и параллельной обмотки приняты с условием, что двигатель теплый.

При надобности может быть произведен пересчет сопротивлений из одной температуры в другую; температурный коэффициент сопротивления меди принимается $\alpha_{\text{м}} = 0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$ как средний при температурах $0-100^{\circ}\text{C}$ [см. (5-20)].

Пример 2-2. Для неизвестного двигателя параллельного возбуждения продолжительного режима 50 кВт, 220 В, 600/1000 об/мин определить сопротивления якоря и параллельной обмотки возбуждения.

Решение. Номинальный ток якоря

$$I_{я.н} = \frac{P_n}{U_n \eta_{я}} \approx \frac{50 \cdot 1000}{220 \cdot 0,9} = 253 \text{ А.}$$

Номинальное сопротивление якоря

$$R_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{220}{253} = 0,87 \text{ Ом.}$$

По кривой рис. 2-3 для двигателя ПН мощностью 50 кВт

$$r_{я.п*} = 0,058.$$

Поэтому сопротивление якоря

$$r_{я.п} = r_{я.п*} R_n = 0,058 \cdot 0,87 = 0,0505 \text{ Ом.}$$

По кривой ПН, до 1 : 2 рис. 2-4 для $P_n = 50$ кВт имеем:

$$\frac{P_{пар}}{P_n} = 0,0135.$$

Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения,

$$P_{пар} = 0,0135 P_n = 0,0135 \cdot 50 = 0,675 \text{ кВт.}$$

Сопротивление параллельной обмотки

$$r_{пар} = \frac{U_n^2}{P_{пар} \cdot 1000} = \frac{220^2}{0,675 \cdot 1000} = 72 \text{ Ом.}$$

А. ДВИГАТЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Двигатели параллельного возбуждения, питаемые от источника постоянного напряжения, применяются обычно для длительного режима работы, когда требуется широкое регулирование частоты вращения, например для металлообрабатывающих станков, для листопрямильных машин в прокатных станах, для главных приводов трубопрокатных станов и т. п.

Иногда они применяются и для повторно-кратковременного режима работы и даже без регулирования частоты вращения полем, когда требуются устойчивые полная и пониженная частоты вращения, например опрокидыватели слитков на рольганг блюминга. Для механизмов повторно-кратковременного режима двигатели параллельного возбуждения, так же как двигатели последовательного и смешанного возбуждения, все чаще вытесняются асинхронными двигателями односкоростными и двухскоростными.

Двигатели параллельного возбуждения широко применяются в системах генератор — двигатель и повсеместно заменяющей ее системе: тиристорный преобразователь — двигатель.

2-3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основой расчета характеристик двигателей является зависимость э. д. с. и момента от параметров двигателей:

$$E = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} \Phi \omega = C \Phi \omega; \quad (2-4)$$

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} \Phi I_{\text{я}} = C \Phi I_{\text{я}}, \quad (2-5)$$

где E — э. д. с. якоря, В; $I_{\text{я}}$ — ток якоря, А; Φ — магнитный поток одного полюса, Вб; ω — угловая частота вращения, рад/с; p — число пар главных полюсов; N — число проводников на якоре; a — число пар параллельных ветвей якоря.

При использовании в расчетах вместо угловой скорости ω в рад/с частоты вращения n в об/мин конструктивный коэффициент C называют механической постоянной $C_{\text{м}}$, а электрическую постоянную C_E определяют из выражения

$$E = \frac{1}{60} \frac{pN}{a} \Phi n = C_E \Phi I_{\text{я}}. \quad (2-4')$$

Из приведенных формул (2-4') и (2-5) вытекает весьма полезное соотношение электрической постоянной C_E и механической постоянной $C_{\text{м}}$:

$$\frac{C_E}{C_{\text{м}}} = \frac{\frac{1}{60} \frac{pN}{a}}{\frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a}} = 0,105. \quad (2-6)$$

Физический смысл этого отношения становится ясным, если произвести простые преобразования в (2-4') и (2-5), а именно:

$$C_E = \frac{E}{\Phi n}; \quad C_{\text{м}} = \frac{M}{\Phi I_{\text{я}}},$$

откуда получим:

$$\frac{C_E}{C_{\text{м}}} = \frac{E I_{\text{я}}}{M n}, \quad (2-7)$$

т. е. отношение постоянных электрической C_E к механической $C_{\text{м}}$ есть отношение электромагнитной мощности,

выраженной в электрических величинах ($E I_{я}$, В·А), к той же электромагнитной мощности, выраженной в механических величинах ($M n$, Н·м·об/мин).

Формула (2-5) дает электромагнитный момент. В расчетах мы будем пренебрегать относительно малыми механическими и вентиляционными потерями в двигателе и считать моменты двигателя на валу равными электромагнитным моментам.

Чтобы представить (2-4') и (2-5) в относительных значениях, примем за единицы:

U_n — номинальное напряжение двигателя, В;

$I_{я.н}$ — номинальный ток якоря, А;

I_n — номинальный ток параллельной обмотки возбуждения, А;

Φ_n — номинальный поток (при I_n), Вб;

M_n — номинальный момент (при Φ_n и $I_{я.н}$), Н·м;

n_0 — частота вращения идеального холостого хода, об/мин, т. е. частота вращения двигателя, при которой его э. д. с. равна U_n , если поток равен Φ_n .

Формулы (2-4') и (2-5) получают вид в относительных значениях

$$E_* = \Phi_* n_*; \quad (2-8)$$

$$M_* = \Phi_* I_{я*}. \quad (2-9)$$

Перейдем теперь к рассмотрению естественных и искусственных характеристик.

Под *естественными* характеристиками двигателей параллельного возбуждения понимаются характеристики, которыми он обладает при полном потоке и без внешних сопротивлений в цепи якоря.

Характеристики двигателя при наличии внешних сопротивлений в цепи или при ослабленном потоке мы будем называть *искусственными*.

Можно доказать, что все механические характеристики двигателя параллельного возбуждения, естественная и искусственные, прямолинейны и пересекаются в одной точке ($M = 0$, $n = n_0$), соответствующей идеальному холостому ходу, как показано на рис. 2-5. При номинальном потоке возбуждения можем (2-4') и (2-5) представить так:

$$E = C'_E n; \quad (2-10)$$

$$M = C'_M I_{я}. \quad (2-11)$$

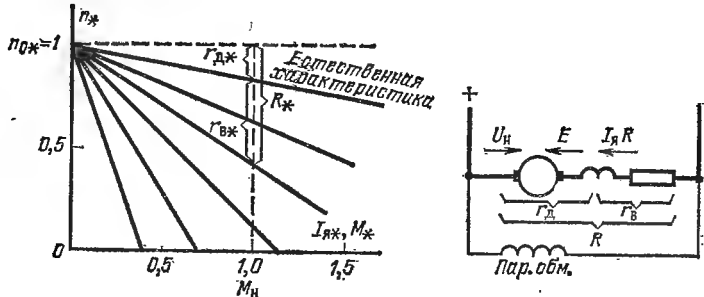


Рис. 2-5. Естественная характеристика и семейство искусственных характеристик двигателя параллельного возбуждения при полном потоке и различных внешних сопротивлениях цепи якоря.

Далее из схемы рис. 2-5 следует, что при любой постоянной частоте вращения двигателя приложенное напряжение U_n уравнивается э. д. с. якоря E и падением напряжения $I_a R$ в сопротивлении всей силовой цепи, т. е.

$$U_n = E + I_a R.$$

После подстановки в это равенство значений E из (2-10) и I_a из (2-11) и преобразований получим частоту вращения в явном виде:

$$n = \frac{U_n}{C'_E} - \frac{R}{C'_E C'_M} M,$$

где, очевидно, $\frac{U_n}{C'_E} = n_0$. Поэтому окончательно для искусственной характеристики

$$n = n_0 - \frac{R}{C'_E C'_M} M, \quad (2-12)$$

или в относительных значениях

$$n_* = 1 - R_* M_*, \quad (2-12')$$

т. е. мы доказали, что все механические характеристики, в частности и естественная при $R = r_d$, прямолинейны и пересекаются в одной точке: $M = 0$, $n = n_0$.

При выводе (2-12) мы исходили из того положения, что поток двигателя постоянен и не зависит от тока якоря. В некомпенсированной машине, как известно, с увеличением тока якоря растет реакция якоря и поток двигателя падает. В дальнейшем мы не будем учитывать ослабление потока от реакции якоря, считая, что стабилизирующие последо-

вательные обмотки на главных полюсах, применяемые для малых и средних двигателей, и компенсационные, применяемые для крупных двигателей, полностью компенсируют реакцию якоря.

Рассматривая свойства естественной характеристики ($R = r_d$), нетрудно видеть, что наклон ее зависит от внутреннего сопротивления двигателя. Если бы оно было равно нулю, то мы получили бы постоянную частоту вращения $n_* = 1$, не зависящую от момента M_* (2-12'). Чем больше внутреннее сопротивление двигателя, тем больше снижение частоты вращения от падения напряжения в цепи якоря и тем больший наклон имеет естественная характеристика.

Двигатели малой мощности имеют более высокие относительные внутренние сопротивления, чем крупные, и потому обладают более мягкими естественными характеристиками.

Нетрудно также видеть, что наклон искусственных механических характеристик определяется полным сопротивлением цепи якоря $R = r_d + r_v$.

Для построения механических характеристик двигателей параллельного возбуждения будем пользоваться условным понятием «относительное падение частоты вращения»:

$$\Delta n_* = 1 - n_*.$$

Из (2-12') следует, что

$$\Delta n_* = R_* M_*.$$

В частности, при номинальном моменте ($M_* = 1$) получим:

$$\Delta n_* = R_*, \quad (2-13)$$

т. е. при номинальном моменте двигателя параллельного возбуждения с полным полем относительное падение частоты вращения равно относительному полному сопротивлению цепи якоря.

Пользуясь (2-13), легко построить естественную механическую характеристику двигателя параллельного возбуждения, проводя прямую из точки идеального холостого хода ($M_* = 0, \Delta n_* = 0$) через точку $M_* = 1, \Delta n_* = r_{d*}$. Так же можно построить искусственную механическую характеристику для любого внешнего сопротивления r_{v*} , проводя прямую через точку $M_* = 1, \Delta n_* = R_* = r_{d*} + r_{v*}$, как показано на рис. 2-5.

Заметим, что при номинальном потоке относительные значения тока якоря $I_{я*}$ равны относительным значениям момента M_* , поэтому представленные механические характеристики будут одновременно являться и характеристиками тока.

2-4. ПУСК С ПОЛНЫМ ПОТОКОМ

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

Внутреннее сопротивление двигателей постоянного тока, в особенности крупных, очень мало, например двигатель ПН мощностью 100 кВт согласно кривым рис. 2-3 имеет внутреннее сопротивление $r_{д*} = 0,05$. Если этот двигатель включить в сеть с полным напряжением, то при неподвижном якоре получим установившийся ток

$$I_{я*} = \frac{U_{н*}}{r_{д*}} = \frac{1}{0,05} = 20,$$

т. е. 20-кратный номинальному. Благодаря индуктивности силовой цепи якоря и ускорению двигателя действительный пусковой ток будет меньше, но все же он будет очень большим.

Такой ток не может быть допущен ни для щеток из-за чрезмерных плотностей тока, ни для обмоток из-за больших электродинамических усилий, ни для вала из-за больших моментов.

Включив последовательно с якром добавочный резистор с сопротивлением $r_в$, можно ограничить пик тока до любого заданного значения

$$I_я = \frac{U_н}{r_д + r_в}$$

и получить желаемый момент.

При разгоне двигателя по мере увеличения частоты вращения растет его э. д. с., направленная против приложенного напряжения, и ток соответственно падает:

$$I_я = \frac{U_н - E}{r_д + r_в}.$$

Вместе с током уменьшается и момент, а следовательно, уменьшается эффективность ускорения. Для поддержания ускорения привода уменьшают внешнее сопротивление, отчего при данной э. д. с. возрастет ток, возрастет и момент,

вызывающий ускорение. Когда внешнее сопротивление будет целиком закорочено, двигатель перейдет на свою естественную характеристику.

Для приводов в зависимости от их конструкций и назначений требуются определенные моменты при трогании с места и при ускорении. Это достигается путем соответствующего расчета сопротивления пускового резистора, т. е. расчета сопротивлений ступеней и их количества. Уменьшение сопротивления пускового резистора при ускорении двигателя осуществляется или в функции времени, или тока, или э. д. с. якоря, или частоты вращения, или пути привода.

Таким образом устанавливаем, что пусковые резисторы служат для ограничения тока двигателя и для ускорения его с определенными значениями моментов соответственно потребностям привода.

2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

На рис. 2-6 показаны основные практически применяемые схемы включения резисторов для двигателя постоянного тока. Контактторы, пускающие двигатель, названы первыми буквами функций, которые они выполняют, т. е. L — линейный; $1U$, $2U$, $3U$ — 1, 2 и 3-й ускорения. Условно показаны на каждой схеме по три контактора ускорения, в действительности их может быть меньше или больше. Справа от схем приведены таблицы последовательности включения контакторов.

В схеме рис. 2-6, *а* резисторы последовательны, контакторы последовательны; в схеме рис. 2-6, *б* резисторы последовательны, контакторы параллельны; в схеме рис. 2-6, *в* резисторы параллельны, контакторы параллельны.

Рассмотрим вначале эти схемы в смысле их преимуществ, для чего проведем сравнение по пунктам: 1) величины контакторов ускорения; 2) использование резисторов; 3) приваривание контакторов (приваривание контактов контакторов).

1. В е л и ч и н ы к о н т а к т о р о в у с к о р е н и я. По схеме рис. 2-6, *а* все контакторы должны быть одной величины, так как при закороченных резисторах они пропускают один и тот же ток, равный току двигателя.

По схеме рис. 2-6, *б* для двигателей с длительным режимом работы представляется возможным контакторы $2L$, $1U$ и $2U$ поставить меньшей величины, чем $1L$ и $3U$, поскольку при замкнутом $3U$ они не пропускают тока. Вследствие

того что по схеме рис. 2-6, б каждый из контакторов ускорения при замыкании пропускает полный ток двигателя, в случае повторно-кратковременного режима двигателя все контакторы должны быть одной величины.

По схеме рис. 2-6, в для двигателей с длительным режимом работы контакторы 2Л, 1У, 2У могут быть применены меньшей величины, чем 1Л и 3У, при этом, благодаря тому

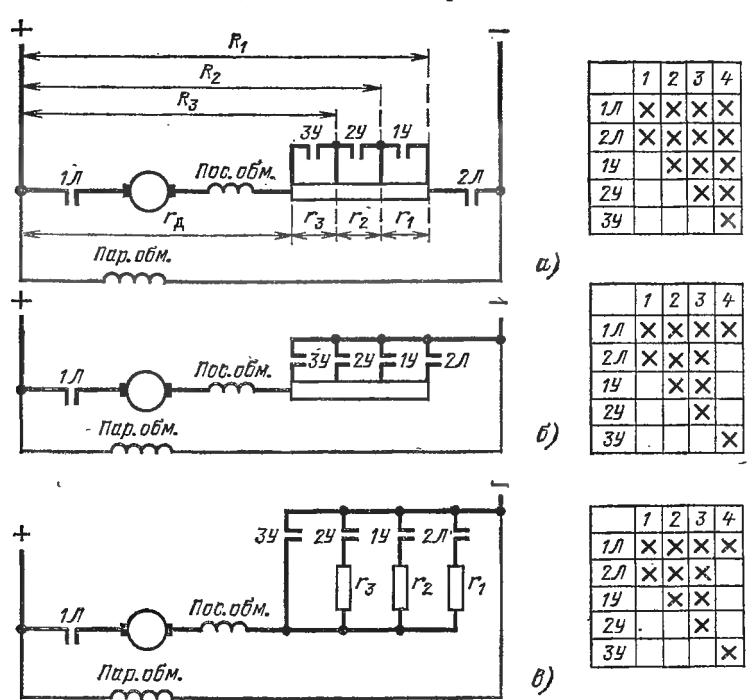


Рис. 2-6. Схемы включения пусковых резисторов для двигателей постоянного тока.

что контакторы 1У и 2У при замыкании пропускают только часть тока двигателя, оказывается возможным по условиям максимального допускаемого тока включения применить их меньшими, чем даже по схеме рис. 2-6, б. Естественно, что контакторы 1У и 2У по схеме рис. 2-6, в могут быть применены меньшими, чем 1Л, 2Л и 3У, и при повторно-кратковременном режиме двигателя.

В случае длительного режима работы двигателя с управлением по схемам рис. 2-6, б и в, чтобы не греть напрасно

катушки контакторов 2Л, 1У и 2У, их отключают при помощи размыкающего блок-контакта 3У.

2. **Использование резисторов.** По условиям нагрева для данного режима работы двигателя во всех трех схемах должно быть применено одинаковое количество активного материала резисторов. Однако, применяя стандартные элементы или ящики резисторов в случае последовательного соединения секций (схемы рис. 2-6, а и б), благодаря возможности использовать остающиеся части элементов или ящиков в каждой из секций для смежной, можно применить меньшее количество элементов или ящиков резисторов, чем при параллельном соединении секций (схема рис. 2-6, в).

Это особенно относится к мелким двигателям, а также к средним и почти не играет роли для крупных, для которых каждая секция составляется из нескольких ящиков.

3. **Приваривание контакторов.** Приваривание любого из контакторов ускорения в схеме рис. 2-6, а не приводит при последующем пуске двигателя к включению его без внешнего сопротивления, тогда как по схемам рис. 2-6, б и в приваривание контактора 3У приведет к включению двигателя напрямую. Последнее является по существу коротким замыканием, которое может вызвать аварию в двигателе и в сети.

Для устранения этой опасности необходимо в случаях управления двигателями по схемам рис. 2-6, б и в вводить электрическую блокировку при помощи размыкающих вспомогательных контактов контакторов ускорения, не позволяющую пустить двигатель, если хотя бы один контактор ускорения остался закрытым.

Теперь после разбора преимуществ схем по рис. 2-6 остановимся на их применении.

а) **Схема рис. 2-6, а** (резисторы последовательны, контакторы последовательны). Эта схема имеет широкое распространение для работающих в любых режимах двигателей малой и средней мощностей, приблизительно до 150 кВт, при 220 В с небольшим числом ступеней сопротивления пускового резистора.

При небольших числах ступеней сопротивления пускового резистора, обычно применяемых для двигателей малой и средней мощностей, уменьшение габаритов панели по схемам рис. 2-6, б и в получается незначительным, между тем введение добавочного типа контактора по эксплуатационным условиям является нежелательным.

Преимуществами схемы рис. 2-6, а для мелких и средних двигателей являются экономичное использование резисторов и меньшая опасность в случае приваривания контактов ускорения. Некоторым преимуществом этой схемы является также более полное отключение силовой цепи двигателя от минуса сети при коротких замыканиях.

б) Схема рис. 2-6, б (резисторы последовательны, контакторы параллельны). Эта схема применяется для мелких и средних двигателей приблизительно до 300 кВт при 220 В, работающих в длительном режиме.

Для мелких двигателей она применяется лишь в тех случаях, когда удастся вместо части контакторов ускорения использовать контакты реле, задающих временную последовательность закорачивания секций пускового резистора.

Для средних двигателей она применяется в случаях, если пусковые резисторы имеют большое число ступеней, вследствие чего уменьшение величин контакторов ускорения дает значительный эффект в смысле снижения стоимости и уменьшения габаритов панели.

Для двигателей с повторно-кратковременным или кратковременным режимом работы схему рис. 2-6, б применять не следует, так как уменьшения величин контакторов ускорения допускать нельзя, а в смысле опасности приваривания контакторов и более полного отключения от минуса сети при коротких замыканиях она хуже схемы рис. 2-6, а.

Для мелких и средних двигателей с длительным режимом схема рис. 2-6, б лучше, чем схема рис. 2-6, в, тем, что дает возможность экономичнее использовать пусковой резистор.

в) Схема рис. 2-6, в (резисторы параллельны, контакторы параллельны). Эта схема применяется преимущественно для крупных двигателей и иногда для средних, начиная приблизительно со 150 кВт при 220 В.

Для средних двигателей схема рис. 2-6, в применяется в случае, когда они работают в кратковременном или повторно-кратковременном режиме с большим числом ступеней в пусковом резисторе. При этих режимах работы схема рис. 2-6, б, как указывалось выше, не позволяет уменьшить величину контакторов ускорения.

Для крупных двигателей схема рис. 2-6, б применяется при любых режимах работы двигателя. Возможность применения для пуска двигателей по этой схеме меньших по величине контакторов ускорения (даже меньших, чем по

схеме рис. 2-6, б) при обычно применяемом для крупных двигателей большом числе ступеней пускового резистора дает значительное уменьшение стоимости и габаритов контакторной панели.

Поскольку для крупных двигателей на каждую ступень пускового резистора применяется несколько ящиков, последние могут быть подобраны с хорошим использованием.

3. РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПУСКЕ

На рис. 2-7 изображены примерные механические характеристики двигателя при пуске в три ступени по схемам рис. 2-6. Около каждой характеристики проставлены обозначения контакторов, замкнутое положение контактов которых обеспечивает данную характеристику.

Представим себе, что статический момент реактивный и остается постоянным, как показано вертикальной линией. При замыкании линейного контактора Л двигатель включится в сеть через полное сопротивление пускового резис-

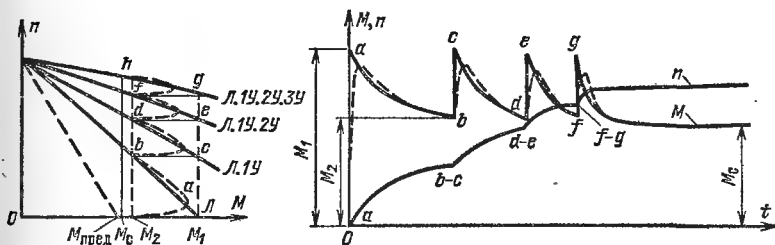


Рис. 2-7. Пусковые характеристики двигателя.

тора и будет сообщать приводу момент M_1 . Этот момент больше статического M_c , вследствие чего привод тронется с места и начнет ускоряться. С увеличением частоты вращения момент двигателя будет уменьшаться по сплошной кривой ab , будут уменьшаться и динамический момент, а следовательно, и эффективность ускорения. При некоторой частоте вращения, соответствующей точке b , замкнется контактор 1У и закортит часть пускового резистора, это вызовет мгновенный переход при данной частоте вращения на характеристику 1У в точке c . Момент двигателя опять возрастет, и поэтому опять увеличится ускорение, которое затем будет уменьшаться, так как с увеличением частоты вращения момент опять падает соответственно кривой cd .

Далее аналогично вышеуказанному будет продолжаться ускорение при замкнутом контакторе $2У$ по кривой ef и, когда замкнется (в точке f) последний контактор ускорения $3У$, двигатель перейдет на свою естественную характеристику.

Двигатель будет продолжать ускоряться до тех пор, пока динамический момент не станет равным нулю, т. е. пока момент двигателя не станет равным статическому, что получится в точке h . Таким образом, ускорение двигателя при его пуске будет происходить по сплошным кривым ab , cd , ef , gh .

Условимся называть в дальнейшем моменты и токи в точках a , c , e , g *пиковыми*, а в точках b , d , f — *переключающими*.

Имея механические характеристики, как на рис. 2-7 (левый), зная момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, можно рассчитать и построить характеристики изменения момента и частоты вращения в функции времени. Расчет этот нетрудно произвести по формуле (1-13), разбив каждую из характеристик на несколько частей для того, чтобы выявить характер изменения момента и частоты вращения на протяжении разгона двигателя на отдельных ступенях. Эти характеристики имеют вид, как показано на рис. 27 (правый), из которого ясно, что сразу после перехода двигателя на новые характеристики его момент очень быстро снижается до значения, близкого к моменту переключения, ускорение почти прекращается, что влечет за собой значительное увеличение времени пуска. Исходя из этого, нужно так рассчитывать сопротивления ступеней пускового резистора и давать такую уставку релé, управляющим контакторами ускорения, чтобы моменты переключения были по крайней мере на 10—20% выше статического.

Если бы с теми же механическими характеристиками, что и на рис. 27, производить закорачивание ступеней пускового резистора при других произвольных частотах вращения, то пики момента, а также моменты переключений получились бы неодинаковыми. Это вызвало бы при закорачивании некоторых ступеней повышенные толчки момента, неблагоприятные для механизма, и создало бы неравномерное ускорение привода. Кроме того, возникающие на некоторых ступенях повышенные броски тока могли бы быть опасными по условиям коммутации.

Очевидно, что благоприятным является такой пуск, при котором пики момента и моменты переключения полу-

чаются одинаковыми на всех ступенях, это мы и положим на основу расчета сопротивлений ступеней резисторов.

Рассматривая механические характеристики двигателей рис. 2-7, мы исходили из установившихся режимов, т. е. из условий, при которых каждому моменту соответствует на механической характеристике вполне определенная установившаяся частота вращения. Эти характеристики были выведены, исходя из картины напряжений на схеме рис. 2-5, где $U_n = E + I_a R$.

Мы упускали из виду, что при изменении тока во время ускорения и замедления в двигателе будет возникать э. д. с. самоиндукции и тогда выражение для напряжений примет вид:

$$U_n = E + I_a R + L di_a/dt,$$

где L — индуктивность силовой цепи, включающая самоиндукцию цепи якоря, взаимную индуктивность ее с обмоткой возбуждения и вихревыми токами в массивных частях магнитной системы. При нарастании тока $di_a/dt > 0$, а при спадании $di_a/dt < 0$, поэтому э. д. с. самоиндукции, равная $L di_a/dt$, положительна и направлена против приложенного напряжения в первом случае, препятствуя нарастанию тока, и отрицательна, т. е. направлена согласно с ним во втором случае, препятствуя спаданию тока. Таким образом, э. д. с. самоиндукции играет роль в электрическом контуре, подобную маховикам в приводах при режимах ускорения и замедления.

В результате действия э. д. с. самоиндукции ток якоря и момент меняются с частотой вращения, как показано пунктиром на рис. 2-7, сглаживая пики тока и момента. Сглаживание будет тем сильнее, чем быстрее ускоряется двигатель, другими словами, чем меньше статический момент и чем меньше момент инерции привода.

Благодаря явлению сглаживания пиков тока оказывается возможным пускать вхолостую мелкие двигатели, приблизительно до 5 кВт, непосредственно включением в сеть без добавочных резисторов. Пусковые условия мелких двигателей облегчаются тем, что они имеют повышенные внутренние сопротивления, и еще тем, что допускают большие по отношению к номинальному пики тока. Однако нельзя рекомендовать частый прямой пуск двигателей постоянного тока мощностью выше 0,5 кВт из-за чрезмерно больших пусковых токов, вызывающих подгар коллектора и щеток.

Для двигателей, пускаемых при помощи пусковых резисторов, сглаживание пиков тока получается небольшим.

Расчет и построение характеристик двигателей с учетом э. д. с. самоиндукции сложны, особенно для двигателей последовательного и смешанного возбуждения.

Во всех дальнейших рассуждениях мы будем исходить из характеристик установившегося режима, несложно рассчитываемых, помня, однако, что действительные пики тока и момента будут меньше расчетных.

4. УСЛОВИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

Для расчета сопротивлений ступеней пусковых резисторов могут иметь место два основных условия:

- 1) задано число ступеней резистора m ;
- 2) не задано число ступеней резистора m .

Первое условие имеет место, если расчет сопротивлений ступеней резистора ведется для уже выбранной стандартной аппаратуры, т. е. для стандартной контакторной панели.

Второе условие имеет место в тех случаях, когда аппаратура для управления двигателем еще не известна и ее нужно выбрать из стандартной с требуемым по условию пуска числом ступеней или если она для данного привода проектируется впервые. Оба условия могут обеспечить пуск нормальный и форсированный.

Под *нормальным* будем понимать такой пуск, когда по производственным условиям не требуется быстрого ускорения привода. Чаще всего это справедливо для редко пускаемых приводов, например для длительно работающих конвейеров, транспортеров, всевозможных станков и т. д. В этих случаях нет надобности заставлять работать двигатель с большими пиками тока и момента, и для того чтобы они получились наименьшими, следует задаваться переключающими моментами, которые могут быть приняты на 10—20% больше статического момента. Необходимо, далее, проверить, чтобы при заданном числе ступеней по первому условию или принятом — по второму условию пики тока и момента не были выше допускаемых, и если это получилось, следует изменить аппаратуру, увеличив число ступеней.

Под *форсированным* будем понимать такой пуск, когда по производственным условиям требуется быстрое уско-

рение привода. Это требуется обычно для часто пускаемых приводов, например для реверсивных строгальных станков, для вспомогательных механизмов прокатных станов и т. д. В этих случаях для возможно быстрого ускорения привода следует задаваться максимально допускаемыми пиками тока или жё момента, смотря по тому, что является более близким ограничением. Необходимо затем проверить, чтобы при заданном или принятом числе ступеней моменты переключений не получились меньше статического, и если это так, то число ступеней пускового резистора должно быть увеличено.

При втором условии, т. е. когда число ступеней не задано и его нужно определить, может потребоваться, кроме двух режимов, еще добавочный режим — плавный пуск. Для расчета сопротивления пускового резистора в этом случае приходится задаваться и пиковыми, и переключающими моментами, и если из расчета число ступеней окажется дробным или из графических построений последний пик момента при переходе на естественную характеристику меньше остальных, то необходимо изменить или пики момента, или моменты переключения так, чтобы число ступеней было целым и все пики момента были одинаковы. Для получения плавного ускорения необходимо, чтобы разность между пиками момента и переключающими была невелика, однако это требует большого числа контакторов, а потому в каждом отдельном случае нужно искать компромиссное решение. В зависимости от режима: нормальный или форсированный пуск, моменты выбираются ближе или к статическому, или к максимально допускаемому.

При контакторном управлении приходится особенно считаться с числом ступеней, так как каждая ступень требует двух аппаратов: контактора и реле. При ручном управлении каждая добавочная ступень обходится дешевле, в особенности для реостатов, а потому, учитывая преимущества плавного пуска, а также произвольный режим закорачивания ступеней резистора, когда по неопытности оператора могут возникнуть чрезмерно большие токи и моменты, при ручном управлении число ступеней для пусковых резисторов делается больше, чем при контакторном. Число ступеней при контакторном управлении часто выбирается без расчета — по аналогии с другими приводами. В этих случаях число ступеней становится известным, и мы получаем из второго условия первое.

Графический способ расчета сопротивлений пусковых резисторов для двигателей параллельного возбуждения базируется на следующих положениях:

а) механические характеристики при любых значениях сопротивлений резисторов в силовой цепи прямолинейны и пересекаются в одной точке, соответствующей идеальному холостому ходу;

б) при номинальном моменте относительные падения частоты вращения якоря равны относительным сопротивлениям силовой цепи двигателя.

Предположим, требуется рассчитать сопротивление пускового резистора для двигателя, управляемого по схеме рис. 2-8. Обозначим соответственно контакторам ускорения сопротивления ступеней резистора через r_1, r_2, r_3 и полные сопротивления цепи, включая якорь двигателя, через R_1, R_2, R_3 .

Построим вначале естественную характеристику по двум точкам: ($M_* = 0, n_* = 1$) — точка a и ($M_* = 1, \Delta n_{н*} = = r_{л*}$).

Затем приступаем к построению искусственных характеристик, для которых точка a , соответствующая идеальному холостому ходу, является общей.

Поскольку число ступеней пускового резистора задано, то согласно предыдущему подпараграфу рассматриваемый случай соответствует первому условию. В зависимости от режима пуска (нормальный или форсированный) следует задаваться или моментами переключений, на 10—20% большими статического, или максимально допустимыми пиками момента.

Предположим, задан форсированный режим, тогда задаемся пиками момента M_1 . Далее предположительно задаемся моментами переключения M_2 в расчете, что для принятого значения M_2 получится требуемое по заданию число ступеней с одинаковыми пиковыми и переключающими моментами. Если при построении это окажется так, то значения переключающих моментов приняты правильно. В противном случае приходится задаваться другим значением переключающих моментов и так до тех пор, пока не получится, как показано на рис. 2-8.

Практически эти построения делаются легкими линиями на миллиметровой бумаге и отнимают немного времени. Проще и точнее определять второе значение момента анали-

тически, как показано ниже, по (2-18) и (2-19). Однако графический способ является весьма ценным, когда нужно выбирать сопротивления ступеней резистора по условиям регулирования частоты вращения двигателя, как показано ниже на рис. 3-15 для асинхронного двигателя.

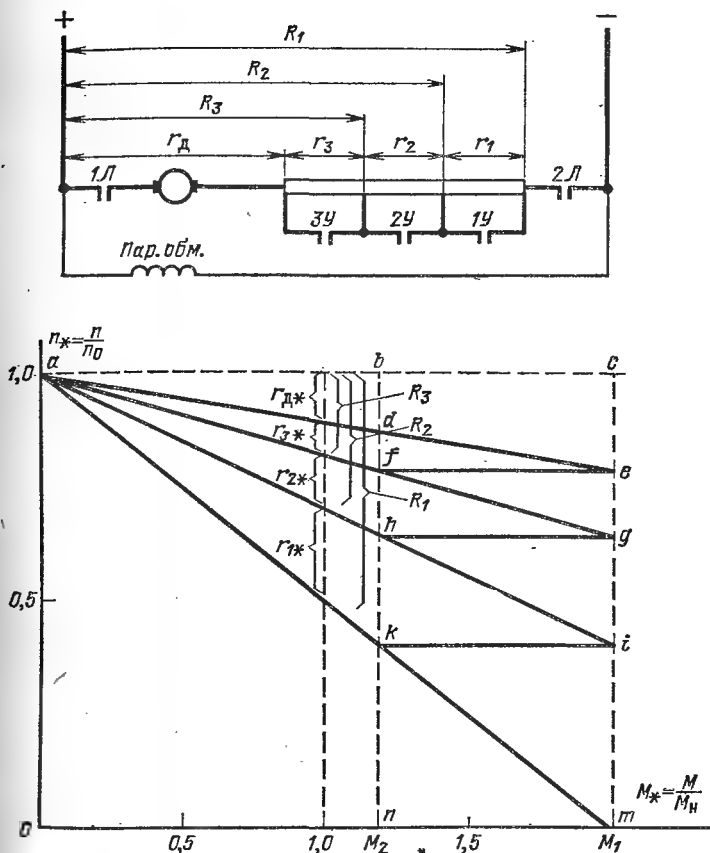


Рис. 2-8. Схема и пусковые характеристики двигателя параллельного возбуждения с тремя ступенями ускорения.

По построенным пусковым характеристикам определяем сопротивления ступеней: r_{1*} , r_{2*} , r_{3*} , отсчитывая их при номинальном моменте как скольжения между смежными характеристиками.

Определив номинальное сопротивление двигателя, можем найти сопротивления ступеней в омах:

$$r_1 = r_{1*} R_n, \quad r_2 = r_{2*} R_n, \quad r_3 = r_{3*} R_n.$$

Как отмечалось выше, этот расчет основан на прямолинейности механических характеристик двигателя параллельного возбуждения, что возможно лишь при полной компенсации реакции якоря компенсационной или стабилизирующей обмоткой.

В действительности из-за неполной компенсации реакции якоря при больших токах пик тока якоря должны были быть выше расчетных. С другой стороны, в процессе ускорения двигателя происходит сглаживание пиков тока, т. е. уменьшение их, из-за самоиндукции цепи якоря.

Таким образом, оба эти неучитываемые в расчете явления противоположны по своему действию и до некоторой степени скрадывают ошибку.

Пример 2-3. Двигатель параллельного возбуждения 25 кВт, 220 В, 420 об/мин, $I_{я.н} = 120$ А, $J_{я} = 6$ кг·м² пускается раз в смену при трехсменной работе.

Статический момент и момент инерции, приведенные к валу двигателя, равны: $M_c = 410$ Н·м, $J_m = 6,5$ кг·м².

Двигатель управляется по схеме на рис. 2-9.

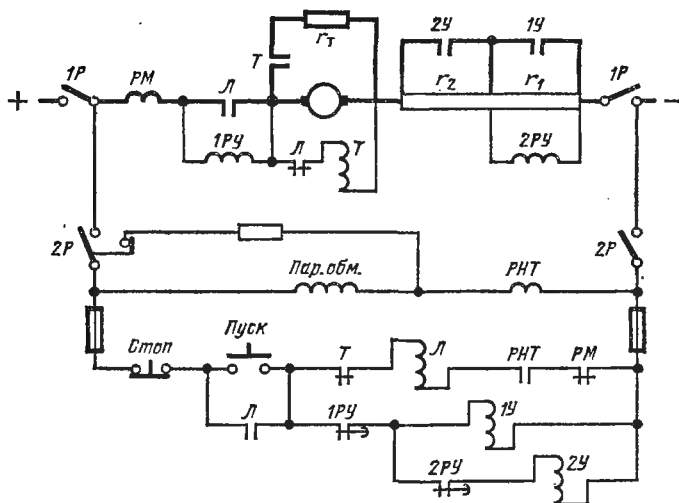


Рис. 2-9. Схема управления двигателем параллельного возбуждения.

Определить графическим методом сопротивлений пусковых ступеней резистора и рассчитать выдержки времени для реле ускорения $1PY$ и $2PY$.

Решение. а) Расчет сопротивлений ступеней резистора. Строим естественную характеристику двигателя, для чего предварительно определяем внутреннее сопротивление его из рис. 2-3:

$$r_{д*} = 0,08.$$

Откладываем на вертикали номинального момента (рис. 2-10) относительное падение частоты вращения $0,08$ (или частоту враще-

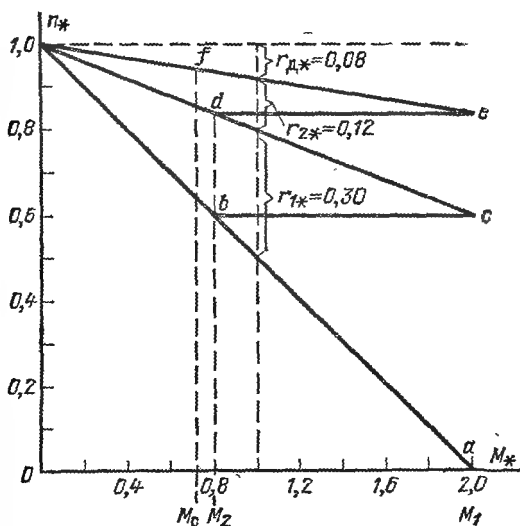


Рис. 2-10. Построение пусковых характеристик двигателя параллельного возбуждения.

ния $0,92$) и через эту точку и точку идеального холостого хода проводим прямую.

Определим M_H и $M_{с*}$:

$$M_H = \frac{P_H}{n_H} 9550 = \frac{25}{420} 9550 = 570 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с*} = \frac{M_c}{M_H} = \frac{410}{570} = 0,72.$$

Вследствие того что двигатель пускается всего 3 раза в сутки, нет необходимости заставлять его быстро ускоряться, учитывая, что удары от пусковых моментов нежелательны. Для минимальных пиков момента, как указывалось ранее, необходимо задаваться переключающими моментами, которые мы примем на 10% выше статического, т. е. будем считать $M_{2*} = 0,80$.

После нескольких пробных построений находим, что для заданных двух ступеней сопротивлений пускового резистора пики момента

$M_{1*} = 2$. Отсчитывая относительные падения частоты вращения между характеристиками при $M_* = 1$, находим сопротивления ступеней резистора $r_{1*} = 0,30$, $r_{2*} = 0,12$.

Найдем номинальное сопротивление двигателя:

$$R_H = \frac{U_H}{I_{я.н}} = \frac{220}{120} = 1,84 \text{ Ом.}$$

Сопротивления ступеней пускового резистора равны:

$$r_1 = r_{1*} R_H = 0,30 \cdot 1,84 = 0,55 \text{ Ом;}$$

$$r_2 = r_{2*} R_H = 0,12 \cdot 1,84 = 0,22 \text{ Ом.}$$

б) Расчет выдержек времени реле $1PY$ и $2PY$. Определим время ускорения привода от начала пуска до закорачивания ступени r_1 , т. е. время разгона по кривой ab (рис. 2-10). Выпишем отдельные значения для (1-13'):

$$J = J_{я} + J_{м} = 6 + 6,5 = 12,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$n_H = 420 \text{ об/мин; } M_H = 570 \text{ Н} \cdot \text{м; } n_a = 0; n_{b*} = 0,60.$$

Из построения имеем:

$$M_{дн a*} = + |M_{1*}| - |M_{с*}| = 2 - 0,72 = 1,28;$$

$$M_{дн b*} = + |M_{2*}| - |M_{с*}| = 0,80 - 0,72 = 0,08.$$

Подстановкой в (1-13') получим:

$$t_{xy} = t_{ab} = \frac{12,5}{4,15} \frac{420}{570} \frac{0,60}{(1,28 - 0,08)} \lg \frac{1,28}{0,08} = 1,35 \text{ с.}$$

Поскольку для второй ступени значения моментов те же, что и для первой, то времена ускорения для этих двух ступеней пропорциональны изменению частот вращения, поэтому:

$$t_{cd} = t_{ab} \frac{(n_{d*} - n_{b*})}{(n_{b*} - 0)} = 1,35 \frac{0,84 - 0,60}{0,60} = 0,54 \text{ с.}$$

Времена t_{ab} и t_{cd} включают в себя каждое время реле и собственное время контактора (0,15 с), поэтому выдержки времени реле найдутся:

$$\begin{array}{ll} \text{для } 1PY & \dots\dots\dots 1,35 - 0,15 = 1,2 \text{ с} \\ \text{для } 2PY & \dots\dots\dots 0,54 - 0,15 \approx 0,4 \text{ с.} \end{array}$$

6. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

Аналитический способ расчета сопротивлений пусковых резисторов для двигателей параллельного возбуждения базируется на тех же положениях, что и графический.

Выведем формулу, по которой можно было бы определить сопротивление любой ступени по данным: внутреннему сопротивлению двигателя и отношению пиков момента к моментам переключения. Для доказательства воспользуемся схемой управления двигателя и характеристиками рис. 2-8.

Из подобия треугольников очевидно, что

$$\left. \begin{aligned} ce &= ar_d; \\ cg &= aR_3; \\ ci &= aR_2; \\ cm &= aR_1, \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Обозначая отношение пиковых моментов к переключающим моментам через

$$\lambda = M_1/M_2, \quad (2-14)$$

легко показать, что

$$\left. \begin{aligned} cg &= bf\lambda = ce\lambda; \\ ci &= bh\lambda = cg\lambda; \\ cm &= bk\lambda = ci\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (б)$$

Значения cg , ci и cm , выраженные в равенстве (б) через λ , введем в равенство (а), в котором заменим ce на ar_d , cg на aR_3 и т. д. После сокращения коэффициента a получим окончательно полные сопротивления:

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= r_d\lambda; \\ R_2 &= R_3\lambda; \\ R_1 &= R_2\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

Полные сопротивления нужны для расчета сопротивлений пусковых резисторов с параллельными секциями. При последовательном соединении секций сопротивления ступеней определяются вычитанием полных сопротивлений.

Пользуясь рис. 2-8 и равенствами (2-15), нетрудно показать, что

$$\left. \begin{aligned} r_3 &= r_d(\lambda - 1); \\ r_2 &= r_3\lambda; \\ r_1 &= r_2\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

Эти же равенства, естественно, справедливы и для относительных значений сопротивления резисторов.

Поскольку моменты M_1 и M_2 зависят от условий заданий и режима привода, выведем формулы для определения λ в возможных случаях.

1. Число ступеней задано. Режим пуска форсированный. В этом случае следует задаваться пиками моментов как максимально допускаемыми.

Из (2-15) вытекает, что для полностью введенного пускового резистора при числе ступеней m

$$R_{1*} = r_{д*} \lambda^m, \quad (2-17)$$

откуда

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_{1*}}{r_{д*}}},$$

но из условий пуска

$$R_{1*} = \frac{U_{н*}}{I_{1*}} = \frac{1}{M_{1*}},$$

поэтому окончательно

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{r_{д*} M_{1*}}}. \quad (2-18)$$

Зная число ступеней пускового резистора m и задаваясь пиками момента M_1 , по (2-18) легко определить λ и по (2-16) сопротивления всех ступеней резистора.

2. Число ступеней задано. Режим пуска нормальный. В этом случае следует задаваться моментами переключения, превышающими статический примерно на 10—20%. В (2-18) вместо M_{1*} подставим его значение из (2-14)

$$M_{1*} = M_{2*} \lambda$$

и тогда получим:

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{r_{д*} M_{2*} \lambda}} = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{1}{r_{д*} M_{2*}}\right)^{\frac{1}{m}}$$

или

$$\lambda^{\frac{m+1}{m}} = \left(\frac{1}{r_{д*} M_{2*}}\right)^{\frac{1}{m}},$$

откуда окончательно

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{r_{д*} M_{2*}}}. \quad (2-19)$$

Зная число ступеней пускового резистора m и задаваясь моментами переключения M_2 , по (2-19) легко определить λ и по (2-16) сопротивления всех ступеней резистора.

3. Число ступеней не задано и его требуется определить. Режим пуска может быть нормальный или форсированный, плавный или неплавный.

При данном условии приходится задаваться и M_{1*} и M_{2*} соответственно требуемому режиму для рассматриваемого привода и определять число ступеней m . Из (2-18) имеем:

$$\lg \lambda = \frac{1}{m} \lg \frac{1}{r_{д*} M_{1*}}.$$

Заменяя λ отношением моментов, окончательно получаем:

$$m = \frac{\lg \frac{1}{r_{д*} M_{1*}}}{\lg \frac{M_{1*}}{M_{2*}}} \quad (2-20)$$

Задаваясь M_{1*} и M_{2*} , определяем по формуле (2-20) число ступеней m , при этом, если оно получится дробным, необходимо изменить M_1 или M_2 или оба так, чтобы получить m целым числом.

По принятым M_{1*} и M_{2*} легко найти λ , пользуясь которым по (2-16) можно определить сопротивления для всех ступеней резистора.

В обычных условиях, когда нет специальных требований для привода, число ступеней может быть принято по аналогии с другими приводами.

Аналитический метод расчета сопротивлений пусковых резисторов точнее графического и отнимает меньше времени. Графический метод дает хорошую наглядность.

Для большинства случаев, когда в режиме ускорения пиковые и переключающие моменты принимаются одинаковыми, лучше пользоваться аналитическим методом.

В тех же случаях, когда на разных ступенях ускорения пиковые и переключающие моменты по условиям привода принимаются различными, выведенные ранее формулы для аналитического расчета непригодны и следует пользоваться только графическим способом.

Пример 2-4. Для двигателя параллельного возбуждения предыдущего примера по рис. 2-9 рассчитать аналитически сопротивления ступеней пускового резистора.

Решение. Как уже было рассмотрено в примере 2-3, мы имеем нормальный режим пуска, а потому для определения λ следует пользоваться формулой (2-19), для которой $m = 2$ по схеме рис. 2-9, $r_{д*} = 0,08$ и $M_{2*} = 0,80$ по предыдущему примеру.

Подстановкой получим:

$$\lambda = \sqrt[2+1]{\frac{1}{0,08 \cdot 0,80}} = \sqrt[3]{\frac{1}{0,064}} = 2,5.$$

Проверяем пики момента:

$$M_{1*} = M_{2*} = 0,80 \cdot 2,5 = 2,$$

что допустимо.

По (2-16) находим:

$$r_{2*} = r_{д*} (\lambda - 1) = 0,08 (2,5 - 1) = 0,12;$$

$$r_{1*} = r_{2*} \lambda = 0,12 \cdot 2,5 = 0,30,$$

т.е. получили совпадение с результатами графического способа по предыдущему примеру.

На рис. 2-11 показана схема включения пускового резистора с параллельным включением секций для случая двигателя параллельного возбуждения с большим числом ступеней ускорения, как это делается для крупных двигателей.

При включении двигателя в сеть замыканием контакторов 1Л—2Л силовая цепь состоит из сопротивления двигателя и последовательно включенного сопротивления r_1 пускового резистора, а при работе на естественной харак-

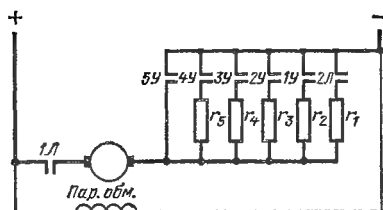


Рис. 2-11. Схема включения пускового резистора с параллельными секциями.

теристике, когда замкнуты 1Л и 5У, силовая цепь состоит только из сопротивления двигателя. В остальных же случаях она складывается из последовательного внутреннего сопротивления двигателя и параллельных внешних сопротивлений ступеней пускового резистора.

Вначале следует определить полные сопротивления силовой цепи $R_5, R_4, \dots, R_1$ по (2-15), при этом λ определяется в зависимости от условий задания и режима привода по одной из ранее выведенных формул (2-18) или (2-19).

Далее, для упрощения расчетов выгодно из полных сопротивлений цепи выделить полные внешние сопротивления (эквивалентные последовательные):

$$r_{в5} = R_5 - r_d;$$

$$r_{в4} = R_4 - r_d;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$r_{в1} = R_1 - r_d.$$

Теперь определим сопротивления ступеней пускового резистора.

При замкнутых 1Л—2Л

$$r_{в1} = r_1 \text{ или } r_1 = r_{в1}.$$

При замкнутых 1Л—2Л, 1У

$$r_{в2} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{1}{\frac{1}{r_{в1}} + \frac{1}{r_2}},$$

откуда

$$r_2 = \frac{r_{B1} r_{B2}}{r_{B1} - r_{B2}}.$$

При замкнутых 1Л—2Л, 1У, 2У

$$r_{B3} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}} = \frac{1}{\frac{1}{r_{B2}} + \frac{1}{r_3}},$$

откуда

$$r_3 = \frac{r_{B2} r_{B3}}{r_{B2} - r_{B3}}.$$

Нетрудно видеть, что полученные выражения имеют определенную закономерность.

Удобно вести расчет сопротивлений секций пускового резистора, составив вспомогательную табл. 2-1.

Таблица 2-1

Вспомогательная таблица для расчета сопротивлений секций пускового резистора к схеме рис. 2-11

Замкнуты контакты	Полное сопротивление цепи ¹	Внешнее сопротивление цепи	Сопротивление секции пускового резистора
1Л—2Л	$R_1 = R_2 \lambda$	$r_{B1} = R_1 - r_d$	$r_1 = r_{B1}$
1Л—2Л, 1У	$R_2 = R_3 \lambda$	$r_{B2} = R_2 - r_d$	$r_2 = \frac{r_{B1} r_{B2}}{r_{B1} - r_{B2}}$
1Л—2Л, 1У, 2У	$R_3 = R_4 \lambda$	$r_{B3} = R_3 - r_d$	$r_3 = \frac{r_{B2} r_{B3}}{r_{B2} - r_{B3}}$
1Л—2Л, 1У, 2У, 3У	$R_4 = R_5 \lambda$	$r_{B4} = R_4 - r_d$	$r_4 = \frac{r_{B3} r_{B4}}{r_{B3} - r_{B4}}$
1Л—2Л, 1У, 2У, 3У, 4У	$R_5 = r_d \lambda$	$r_{B5} = R_5 - r_d$	$r_5 = \frac{r_{B4} r_{B5}}{r_{B4} - r_{B5}}$
1Л, 5У	r_d	0	0

¹ Расчет второго столбца ведется снизу вверх.

2-5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МОМЕНТЫ

Сопротивление предварительной ступени пускового резистора рассчитывается так, чтобы момент двигателя получился меньшим статического или равным ему, но чтобы двигатель тронулся с места, привел в соприкосновение зубцы редукторов и все элементы привода и привел, если имеются, ремни или канаты, или цепи в натянутое состояние.

Графически сопротивление предварительной ступени пускового резистора определяется очень просто: принятый предварительный момент откладывается на оси моментов (см. рис. 2-7, левый), затем из точки идеального холостого хода проводится прямая через данную точку до пересечения с вертикальной линией, соответствующей номинальному моменту; тогда относительное падение частоты вращения, отсчитанное по этой вертикали, между построенной характеристикой и характеристикой при полном сопротивлении ступеней ускорения будет представлять собой относительное сопротивление предварительной ступени пускового резистора.

Аналитический расчет сопротивления предварительной ступени пускового резистора производится так: по принятому относительному предварительному моменту определяем полное сопротивление пускового резистора, включая предварительную ступень:

$$R_* = \frac{U_{н*}}{I_{пред*}} = \frac{1}{M_{пред*}}. \quad (2-21)$$

Вычитая из полученного значения сопротивления полное сопротивление ступеней ускорения $R_{у*}$, известное из ранее проведенного расчета, получаем сопротивление предварительной ступени для последовательного соединения секций пускового резистора:

$$r_{пред*} = R_* - R_{у*}. \quad (2-22)$$

Иногда применяют две и более предварительные ступени, при этом их сопротивления рассчитываются так, чтобы скачки моментов при включении двигателя и переходе с одной предварительной ступени на следующие были одинаковыми.

Предварительные моменты для приводов, как указывалось, желательны, а для некоторых обязательны. Однако следует помнить, что они требуют добавочных предварительных ступеней пусковых резисторов и контактов для управления ими, а также несколько задерживают процесс пуска. При контакторном управлении двигателями введение предварительных ступеней обходится сравнительно дорого, так как требует дополнительных контакторов и вызывает увеличение габаритов панели, поэтому они вводятся редко, при крайней в этом необходимости.

При управлении двигателями при помощи контроллеров силового тока или реостатов, когда добавочные контакты

обходятся дешево, предварительные ступени пусковых резисторов применяются широко. Интересно отметить, что для приводов с торможением противовключением, как будет рассмотрено ниже, предварительный момент получается сам собой за счет сопротивления ступени противовключения.

Пример 2-5. Лента разливочной машины для чугуна приводится двигателем параллельного возбуждения 20 кВт, 220 В, $I_{я.н} = 100$ А с регулированием частоты вращения полем 600/1200 об/мин. Двигатель пускается контакторной панелью, осуществляющей одну предварительную ступень, три ступени ускорения при помощи ступеней резистора в цепи якоря и две ступени ускорения ослаблением поля. Из приведенного расчета сопротивления пускового резистора известно, что полное сопротивление ступени ускорения пускового резистора и якоря равно $R_{y*} = 0,65$.

Статический момент механизма на валу двигателя $M_c = 0,5$ номинального момента двигателя.

Рассчитать сопротивление предварительной ступени пускового резистора.

Решение. Для натяжения ленты примем предварительный момент равным статическому, т. е. $M_{пред*} = 0,5$.

Полное сопротивление пускового резистора, включая предварительную ступень, по (2-21):

$$R_* = \frac{1}{M_{пред*}} = \frac{1}{0,5} = 2.$$

Сопротивление предварительной ступени (2-22)

$$r_{пред*} = R_* - R_{y*} = 2 - 0,65 = 1,35.$$

Определим сопротивление предварительной ступени в омах:

$$R_H = \frac{U_H}{I_{я.н}} = \frac{220}{100} = 2,2 \text{ Ом};$$

$$r_{пред} = r_{пред*} R_H = 1,35 \cdot 2,2 = 3 \text{ Ом}.$$

2-6. УСКОРЕНИЕ И ЗАМЕДЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЕМ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

При изменении напряжения, подводимого к параллельной обмотке возбуждения двигателя, сравнительно медленно происходят процессы изменения тока в обмотке и потока в магнитной системе. Поэтому при управлении потоком двигателя необходимо учитывать инерционность магнитной системы.

В расчетах регулирования потока приходится рассматривать отдельно статические и динамические характеристики двигателя.

Статическими характеристиками двигателя будем называть характеристики, связывающие частоту вращения с то-

ком якоря или моментом, или э. д. с. двигателя при установившихся режимах.

Динамическими характеристиками двигателя будем называть характеристики, связывающие те же величины, но при переходных, неустановившихся режимах.

1. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

При ослабленном потоке статические характеристики тока и момента двигателя параллельного возбуждения прямолинейные, так же как в случае полного потока.

Но частота вращения идеального холостого хода ($I_a = 0$, $E = U_n$) при ослабленном потоке будет выше, чем при полном потоке, так как ту же по величине э. д. с., уравновешивающую приложенное напряжение сети, двигатель может развить только при более высокой частоте вращения.

Из равенства

$$E = C_E \Phi n$$

следует, что для того, чтобы при разных потоках Φ э. д. с. E была равна одному и тому же номинальному напряжению сети U_n , частота вращения n должна увеличиваться обратно пропорционально ослаблению потока. Например, если поток ослаблен вдвое, то частота вращения должна увеличиться также вдвое и т. д. Вторая точка прямолинейной характеристики тока легко находится для неподвижного двигателя, так как при этом ток ограничивается только его внутренним сопротивлением, т. е. при $n = 0$ имеем:

$$I_a = U_n / r_d.$$

Очевидно, что эта точка является общей для любых значений потока. На рис. 2-12 дано семейство характеристик тока двигателя параллельного возбуждения при номинальном потоке (Φ_1) и при ослабленном потоке вдвое (Φ_2) и втрое (Φ_3). Характеристики рассчитаны для двигателя с внутренним сопротивлением цепи якоря $r_{d*} = 0,05$, поэтому ток при неподвижном якоре получился $1/0,05 = 20$ -кратным. Реальные части характеристик, ограниченные допускаемыми токами якоря, показаны толстыми сплошными линиями, а нереальные — пунктиром.

Момент неподвижного якоря при номинальном потоке будет, как и ток, 20-кратным, при ослабленном вдвое —

$20/2 = 10$ -кратным, а ослабленном втрое — $20/3 = 6,67$ -кратным и т. д. Это вытекает из формулы момента

$$M = C_m \Phi I_{\text{я}},$$

если считать для всех трех приведенных характеристик ток одинаковым. Кривые момента обозначены M_1 , M_2 и M_3 с теми же индексами, что и соответствующие токи якоря.

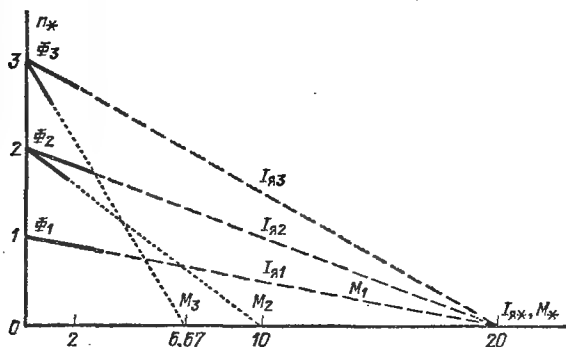


Рис. 2-12. Статические естественная и искусственные характеристики двигателя при ослаблении потока.

На основании рис. 2-12 можно сделать заключение, что для компенсированного двигателя параллельного возбуждения при ослаблении потока увеличивается крутизна статических характеристик тока якоря и момента, притом характеристика момента круче, чем тока.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

При ослаблении потока двигатель, как известно, ускоряется. Это происходит оттого, что ток якоря растет в большей степени, чем ослабляется поток. Действительно, ток якоря равен:

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}} - E}{r_{\text{д}}} \quad \text{или в относительных значениях} \quad I_{\text{я}*} = \frac{1 - E_*}{r_{\text{д}*}}.$$

Если внутреннее сопротивление двигателя $r_{\text{д}*} = 0,05$, то при номинальном токе $I_{\text{я}*} = 1$ и номинальном потоке $\Phi_* = 1$ э. д. с. двигателя будет $E_* = 0,95$. Момент двигателя будет равен номинальному. Ослабляя поток всего на 5%, мы получаем $E_* = 0,9$ и разность напряжения $U_{\text{н}} - E$ удвоится, в результате чего ток якоря станет

2-кратным. Момент двигателя по отношению к номинальному возрастет:

$$M_* = \Phi_* I_{я*} = 0,95 \cdot 2 = 1,9\text{-кратный.}$$

Возникнет избыточный (динамический) момент $M_{дн*} = 1,9 - 1 = 0,9$, который вызовет ускорение двигателя. Таким образом, двигатель начнет ускоряться в результате действия двух явлений: 1) ослабления поля во времени, 2) изменения э. д. с., тока якоря и момента.

Ослабление потока двигателя во времени можно рассматривать самостоятельно независимо от тока якоря,

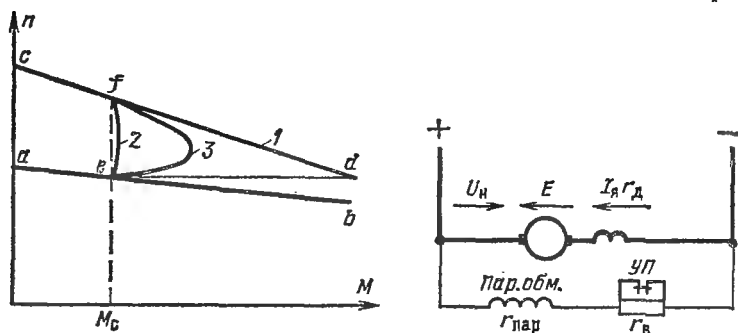


Рис. 2-13. Ускорение двигателя параллельного возбуждения ослаблением потока.

если считать двигатель компенсированным и не учитывать замедляющего действия на поток вихревых токов в массивных частях магнитной системы.

Характер изменения э. д. с. двигателя, вызывающей изменение тока якоря, зависит не только от изменения потока во времени, но еще от механических параметров привода: от статического момента и момента инерции привода.

Рассмотрим, как влияют указанные величины на процесс ускорения двигателя. Предположим, двигатель имеет естественную характеристику ab (рис. 2-13) и искусственную статическую характеристику cd при введенном резисторе $r_в$ последовательно параллельной обмотке возбуждения. Предположим далее, что когда двигатель работал на естественной характеристике в точке e , определяемой статическим моментом M_c , открылся контакт УП контактора «ускорения потоком» и ввел резистор $r_в$.

Если бы поток от параллельной обмотки возбуждения уменьшился мгновенно, то при данной частоте вращения

двигатель перешел бы сразу на искусственную характеристику в точке d . Далее, благодаря возникновению динамического момента двигатель ускорялся бы по статической характеристике 1 до установившейся частоты вращения в точке f . Процесс ускорения будет протекать также и при реальной быстрой ослаблении потока, но при очень большом моменте инерции привода, потому что поток успеет упасть раньше, чем привод сумеет увеличить свою частоту вращения.

Предположим другой крайний случай: поток двигателя изменяется очень медленно, так что привод успевает ускоряться и следовать за изменением потока. Тогда ускорение будет происходить по динамической характеристике 2 до той же установившейся частоты вращения в точке f . Так же будет протекать процесс ускорения при реальной быстрой ослаблении потока, но при очень малом моменте инерции.

При реальной быстрой изменении потока и реальном моменте инерции привода ускорение привода будет происходить по какой-то средней динамической характеристике, например 3, между крайними характеристиками 1 и 2. Теперь перейдем к количественным оценкам.

3. РАСЧЕТ ГРАФИКОВ ПОТОКА ВО ВРЕМЕНИ

Рассмотрим, как нарастает во времени поток главных полюсов двигателя при подаче на обмотку полного напряжения и как падает поток при введении резистора последовательно обмотке возбуждения.

Эти кривые понадобятся нам в дальнейшем для расчета изменения во времени э. д. с., тока, частоты вращения и момента двигателя.

Основой для расчета кривых изменения потока во времени являются кривая намагничивания двигателя и параметры обмотки возбуждения. На рис. 2-14 дана универсальная (средняя) кривая намагничивания для серии краново-металлургических двигателей и двигателей длительного режима параллельного возбуждения. Здесь за единицу приняты: I_n — номинальный ток возбуждения; Φ_n — номинальный поток одного полюса (полезный) от тока I_n .

Из рис. 2-14 видно, что насыщение магнитной системы начинает сказываться при токе $i_* \approx 0,3$.

При включении в сеть параллельной обмотки возбуждения двигателя, имеющей сопротивление $r_{пар}$ и индуктив-

ность $L_{\text{пар}}$, будет нарастать ток и в каждый данный момент времени

$$U_{\text{н}} - ir_{\text{пар}} - L_{\text{пар}} \frac{di}{dt} = 0,$$

т. е. алгебраическая сумма напряжений и э. д. с. в контуре в каждый момент времени равна нулю.

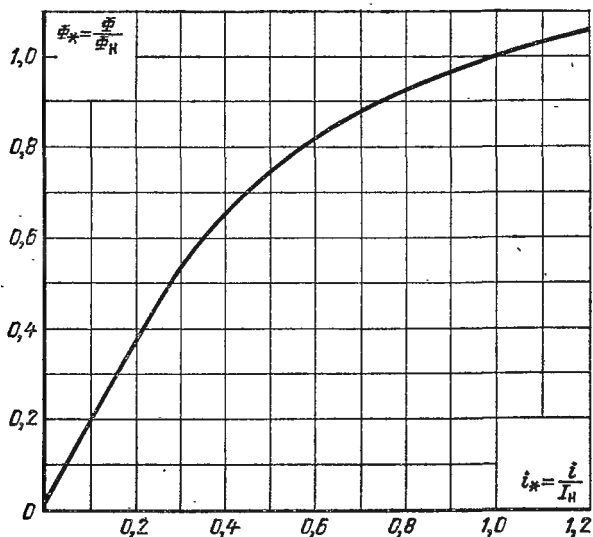


Рис. 2-14. Универсальная кривая намагничивания для двигателей параллельного возбуждения типов МП, ДП, Д, ПН и П.

Отсюда получим известную формулу для нарастания тока во времени:

$$i = I_{\text{у}}(1 - e^{-t/T_{\text{э}}}) + I_{\text{нач}}e^{-t/T_{\text{э}}}, \quad (2-23)$$

где $I_{\text{нач}}$, i , $I_{\text{у}}$ — токи возбуждения начальный, текущий и установившийся; $e = 2,718$ — неперово число; $T_{\text{э}}$ — электромагнитная динамическая постоянная времени¹ обмотки возбуждения с магнитной системой, с:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{пар}}}{r_{\text{пар}}} = \frac{m\omega}{r_{\text{пар}}} \frac{d\Phi}{dI} k_s; \quad (2-24)$$

¹ В дальнейшем будем называть сокращенно «электромагнитная постоянная времени».

m — число последовательно соединенных обмоток полюсов. При последовательном соединении всех полюсов $m = 2p$, при параллельном соединении всех полюсов $m = 1$; w — число витков одного полюса. Если каждый полюс имеет несколько одинаковых параллельных ветвей (применяется иногда в крупных машинах), то число витков нужно брать только одной ветви; $r_{\text{пар}}$ — сопротивление всей обмотки возбуждения двигателя, измеренное на внешних зажимах, Ом; Φ — полезный магнитный поток одного полюса, Вб; I — ток всей обмотки возбуждения, т. е. внешний ток, забираемый из сети, А; $k_s = 1,1 \div 1,25$ — коэффициент рассеяния главных полюсов, вводимый в формулу для получения полного потока, сцепляющегося с витками параллельной обмотки возбуждения [Л.12].

Формула (2-24) дана в виде, удобном для расчетов по параметрам, которые обычно даются заводами-изготовителями электродвигателей.

Обращаем внимание, что электромагнитная постоянная времени двигателя равна электромагнитной постоянной одного полюса:

$$T_{\text{э}} = \frac{w}{r_{\text{пол}}} \frac{d\Phi}{dI_{\text{пол}}} k_s, \quad (2-24')$$

где $r_{\text{пол}}$ — сопротивление обмоток одного полюса, при наличии параллельных ветвей — сопротивление всех параллельно включенных ветвей; $I_{\text{пол}}$ — ток обмотки возбуждения полюса, при наличии параллельных ветвей — сумма токов всех параллельных ветвей.

Формула (2-24'), дающая тот же результат, что и (2-24), может быть полезной для проверочных расчетов при возможных затруднениях в расчетах по (2-24) при сложных схемах соединения обмоток возбуждения полюса двигателя.

В (2-24) производная $d\Phi/dt$ берется из кривой намагничивания $\Phi = f(I)$.

Если кривая намагничивания дана в виде $\left(\frac{E}{n}\right) = f(I)$, то электромагнитную постоянную времени удобнее определять по величине $\left(\frac{E}{n}\right)$, пропорциональной магнитному потоку Φ и представляющей собой э. д. с. якоря, генерируемую при вращении его с частотой вращения один оборот в минуту. На основании (2-24) и (2-4) получим:

$$T_{\text{э}} = \frac{60mawk_s}{pNr_{\text{пар}}} \frac{d\left(\frac{E}{n}\right)}{dI}, \quad (2-24'')$$

где a — число параллельных ветвей обмотки якоря; N — число стержней на якоре (полное количество стержней на всем якоре); p — число пар полюсов у двигателя; E — э. д. с. якоря двигателя, B ; n — частота вращения двигателя, об/мин.

Для полного представления об электромагнитной постоянной времени выразим ее через такие величины, которые отражают размеры и конструкцию электромагнитной системы двигателя.

В (2-24') умножим числитель и знаменатель на ω и перепишем ее в виде

$$T_{\text{э}} = \frac{1}{\frac{r_{\text{пол}}}{\omega^2} \frac{dI_{\text{пол}}\omega}{d\Phi}} k_s.$$

Здесь $\frac{r_{\text{пол}}}{\omega^2} = r_{\text{э.в}}$ — электрическое сопротивление одного эквивалентного витка на полюсе, заменяющего по объему меди реально существующие ω витков; $dI_{\text{пол}}\omega/d\Phi = R_{\text{магн}}$ — магнитное сопротивление системы двигателя.

После подстановки получим окончательно:

$$T_{\text{э}} \equiv \frac{1}{r_{\text{э.в}} R_{\text{магн}}}. \quad (2-25)$$

Таким образом, электромагнитная постоянная времени тем больше, чем меньше электрическое сопротивление одного эквивалентного витка $r_{\text{э.в}}$ (т. е. чем больше сечение меди полюса) и чем меньше магнитное сопротивление $R_{\text{магн}}$ (т. е. чем меньше воздушный зазор в машине и больше сечение магнитной системы). Очевидно, что крупные двигатели имеют большую $T_{\text{э}}$, чем мелкие.

Можно показать, что электромагнитная постоянная времени $T_{\text{э}}$ электромагнита при данном токе возбуждения i есть время, в течение которого под действием неизменного приложенного напряжения U ток возбуждения изменился бы от данного до установившегося $I_y = U/r_{\text{пар}}$, если бы вся электрическая энергия расходовалась только на образование магнитного поля и магнитная проницаемость системы оставалась неизменной.

В ненасыщенной магнитной системе при росте тока электромагнитная постоянная времени остается постоянной, затем с насыщением она падает и при сильном насыщении становится малой и опять постоянной. Так, у двигателей типов ПН и МП при номинальном токе возбуждения $T_{\text{э}}$ составляет всего около 0,2 ее значения при малых токах.

Из рис. 2-15 видно, что электромагнитные постоянные времени в ненасыщенном состоянии $T_{э.н}$ для краново-металлургических двигателей типа МП значительно выше, чем для двигателей общего применения типа ПН, что объясняется (2-25) большим суммарным сечением меди на полюсах и малым магнитным сопротивлением системы.

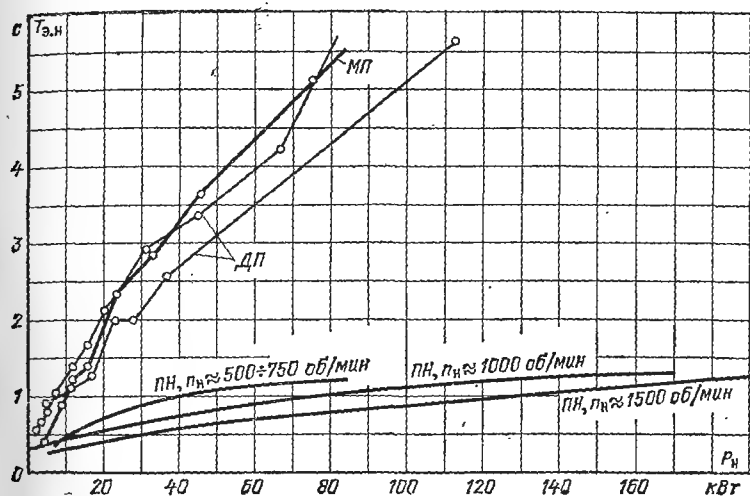


Рис. 2-15. Кривые зависимости электромагнитной постоянной времени параллельной обмотки возбуждения при ненасыщенных двигателях ($T_{э.н}$) от номинальных мощностей двигателя (P_n), краново-металлургических типов МП, ДП и общего применения типа ПН.

Для двигателей типа ДП показаны две кривые: верхняя для тихоходного исполнения и нижняя для быстроходного исполнения.

Электромагнитные постоянные времени двигателей типа МП являются чрезмерно высокими и неудовлетворительными во всех тех случаях, где требуется иметь быстрое ускорение и замедление привода при управлении потоком возбуждения двигателя.

Двигатели с широкими пределами регулирования 1 : 3 — 1 : 4 имеют повышенные электромагнитные постоянные времени по сравнению с нерегулируемыми двигателями тех же мощностей, так как они изготавливаются обычно с меньшими номинальными частотами вращения, следовательно, более крупными.

Теперь рассмотрим, как рассчитать кривые нарастания и спада потока во времени. Для этого преобразуем формулу (2-23) так, чтобы, задаваясь последовательно по известной кривой намагничивания начальными $I_{\text{нач}}$ и конечными $I_{\text{кон}}$ значениями тока и определяя для этого диапазона среднюю постоянную $T_{\text{э}}$, можно было рассчитать соответствующую

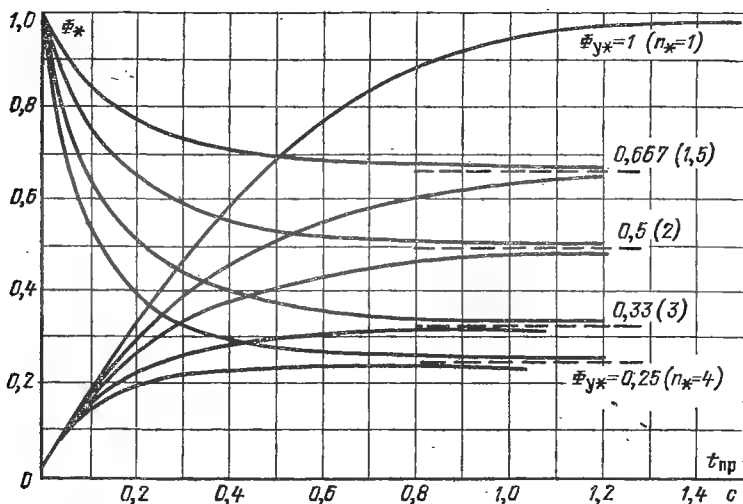


Рис. 2-16. Кривые нарастания и спада потока двигателя во времени при электромагнитной постоянной времени, меняющейся в соответствии с кривой намагничивания рис. 2-14.

Электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения при ненасыщенном двигателе принята $T_{\text{э.н}} = 1$ с.

щее время Δt изменения тока. Заменяя текущий ток $i = I_{\text{кон}}$ и $t = \Delta t$ из (2-23), получаем:

$$\Delta t = 2,3 T_{\text{э}} \lg \frac{I_{\text{у}} - I_{\text{нач}}}{I_{\text{у}} - I_{\text{кон}}} \quad (2-26)$$

По этой формуле рассчитаны при помощи вспомогательной табл. 2-2 кривые нарастания потока (рис. 2-16) при включении напряжения возбуждения и кривые спада потока при включении резистора последовательно обмотке, возбужденной до этого номинальным током.

Для спада потока приняты такие сопротивления цепи обмотки возбуждения, при которых получаются установившиеся потоки $\Phi_{\text{у*}} = 0,667; 0,5; 0,333$ и $0,25$, соответствующие частотам вращения $n_* = 1,5, 2, 3$ и 4-кратной.

Расчет кривых изменения потока во времени *
[к рис. 2-16, формула (2-26)].
Величины i , Φ даны в относительных значениях

Из кривой намагничивания рис. 2-14		Δi	$\Delta \Phi$	$\frac{\Delta \Phi}{\Delta i}$	$T_{э.цепи}, c$	$I_y - i$	$\frac{I_y - I_{нач}}{I_y - I_{кон}} = A$	$\lg A$	$\Delta t_{пр} = 2,3 T_{э} \times \lg A, c$	$t_{пр} = \sum \Delta t_{пр}, c$
i	Φ									
Н а р а с т а н и е п о т о к а $\Phi = \rightarrow 1$										
0	0,02	0	0,02	—	1	+1,0	—	—	—	0
0,1	0,19	0,1	0,17	1,7	1 **	+0,9	1,11	0,0453	0,104	0,104
0,2	0,36	0,1	0,17	1,7	1	+0,8	1,125	0,051	0,117	0,221
0,3	0,525	0,1	0,165	1,65	0,971 ***	+0,7	1,142	0,058	0,129	0,350
С п а д а н и е п о т о к а $\Phi = 1 \rightarrow 0,5$										
1	1	0	0	—	—	—0,72	—	—	0	0
0,95	0,983	0,05	0,017	0,34	0,056 ****	—0,67	1,074	0,031	0,004	0,004
0,9	0,965	0,05	0,018	0,36	0,0592	—0,62	1,08	0,034	0,00463	0,0086
0,8	0,923	0,1	0,042	0,42	0,0692	—0,52	1,19	0,0765	0,0122	0,0208

* В таблице приведено для примера только несколько начальных строк расчета.

** Для обмотки возбуждения насыщенного двигателя при $\Delta \Phi_*/\Delta I_* = 1,7$ принято $T_{э} = 1$ с.

*** $T_{э.цепи} = 0,971$, с (четвертая строка сверху) определена как $1,65 : 1,7$ из предыдущего столбца, так как $T_{э.цепи}$ принята за единицу при $\Delta \Phi_*/\Delta I_* = 1,7$.

**** При включении последовательного резистора r_v в насыщении согласно формуле (2-24) $T_{э.цепи}$ уменьшается. Например, для спадающего потока $\Phi_* = 1 \rightarrow 0,5$. При переходном токе $i_* = 0,95$ (вторая строка сверху) получим $T_{э.цепи}$ делением электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения с последовательным резистором в ее цепи по (2-24) на постоянную времени обмотки возбуждения без последовательного резистора при насыщенном двигателе, когда $\Delta \Phi_*/\Delta I_* = 1,7$ и $T_{э} = 1$ с, т. е.

$$T_{э.цепи} = \frac{r_{пар}}{r_{пар} + r_v} \frac{\Delta \Phi_*/\Delta I_*}{1,7} = 0,28 \frac{0,34}{1,7} = 0,056 \text{ с.}$$

где $\frac{r_{пар}}{r_{пар} + r_v} = i_{y*} = 0,28$ определена по кривой намагничивания рис. 2-14 для установившегося потока $\Phi_* = 0,5$.

Заметим, что применяемый в расчете простой перевод токов возбуждения в потоки по кривой намагничивания предполагает отсутствие вихревых токов.

Кривые рис. 2-16 являются универсальными для двигателей типов МП, ДП, Д и ПН, потому что они рассчитаны на основании универсальной кривой намагничивания рис. 2-14. Для всех этих кривых электромагнитная постоянная

времени собственно обмотки возбуждения в ненасыщенной части кривой намагничивания принята равной 1 с, т. е. $T_{э.н} = 1$ с. Очевидно, что данные кривые справедливы для любых других $T_{э.н}$ обмоток возбуждения, если пропорционально изменить масштаб времени.

Время, приведенное к электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения $T_{э.н} = 1$ с, будем называть приведенным временем $t_{пр}$. Действительное время t найдется с помощью известной номинальной электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения ненасыщенного двигателя:

$$t = t_{пр} T_{э.н} \text{ или } \Delta t = \Delta t_{пр} T_{э.н}.$$

В табл. 2-2 времена даны приведенные (два последних столбца).

Понятие «приведенное время» введено нами для обобщения, которое позволило, как показано на рис. 2-16, получить кривые нарастания и спадания потока во времени, охватывающие двигатели с любыми электромагнитными постоянными времени.

За номинальную принята электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения $T_{э.н}$ ненасыщенного двигателя, позволяющая лучше обобщать характеристики двигателей и расчеты, чем если бы было принято значение при номинальном токе возбуждения. Кроме того, электромагнитная постоянная времени (динамическая) проще и точнее определяется по прямолинейной части кривой намагничивания ненасыщенного двигателя (рис. 2-14), чем на криволинейных участках.

4. РАСЧЕТ ГРАФИКОВ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ, Э. Д. С., ТОКА И МОМЕНТА ДВИГАТЕЛЯ ВО ВРЕМЕНИ

В основу расчета переходных процессов положим известную формулу динамики (1-7):

$$dt = J \frac{d\omega}{M_{дн}},$$

в которой заменим угловую скорость ω (рад/с) на частоту вращения n (об/мин), используя (1-10):

$$dt = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{M_{дн}}.$$

Заменим дифференциалы малыми приращениями Δt и Δn и выразим в явном виде Δn потому, что в расчетах удобнее задаваться приращением времени

$$\Delta n = \frac{9,55}{J} M_{\text{дн}} \Delta t.$$

Здесь динамический момент в общем, алгебраическом, виде по (1-1):

$$M_{\text{дн}} = M + M_{\text{с}},$$

где момент двигателя

$$\begin{aligned} M &= C_{\text{м}} \Phi I'_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi \frac{U_{\text{н}} - E}{r_{\text{д}}} = C_{\text{м}} \Phi \frac{U_{\text{н}} - C_{\text{Е}} \Phi n}{r_{\text{д}}} = \\ &= C_{\text{м}} \Phi \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{д}}} - \frac{C_{\text{м}} C_{\text{Е}}}{r_{\text{д}}} \Phi^2 n. \end{aligned}$$

Подставляя это значение момента двигателя в равенство динамического момента, а последний в предшествующее равенство, получаем:

$$\Delta n = \frac{9,55}{J} \left(C_{\text{м}} \Phi \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{д}}} - \frac{C_{\text{м}} C_{\text{Е}}}{r_{\text{д}}} \Phi^2 n + M_{\text{с}} \right) \Delta t.$$

Для малых времен Δt будем считать переменные величины потока и частоты вращения постоянными и равными средним значениям, т. е.

$$\Phi = \Phi_{\text{ср}} \quad \text{и} \quad n = n_{\text{ср}} = n_{\text{нач}} + \frac{\Delta n}{2}.$$

Подставляя эти величины в последнее равенство, после преобразований получаем:

$$\Delta n = \frac{C_{\text{м}} \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{д}}} \Phi_{\text{ср}} - \frac{C_{\text{м}} C_{\text{Е}}}{r_{\text{д}}} \Phi_{\text{ср}}^2 n_{\text{нач}} + M_{\text{с}}}{\frac{J}{9,55 \Delta t} + \frac{C_{\text{м}} C_{\text{Е}}}{2 r_{\text{д}}} \Phi_{\text{ср}}^2}. \quad (2-27)$$

Заменяя

$$U_{\text{н}} = I_{\text{я.н}} R_{\text{н}}, \quad C_{\text{м}} = \frac{M_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}} I_{\text{я.н}}}, \quad C_{\text{Е}} = \frac{U_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}} n_0} = \frac{I_{\text{я.н}} R_{\text{н}}}{\Phi_{\text{н}} n_0},$$

после преобразований получаем окончательно (постоянные величины заключены в скобки):

$$\Delta n = \frac{\left(\frac{R_{\text{н}}}{r_{\text{д}}} \frac{n_0}{\Phi_{\text{н}}} \right) \Phi_{\text{ср}} - \left(\frac{R_{\text{н}}}{r_{\text{д}}} \frac{1}{\Phi_{\text{н}}^2} \right) \Phi_{\text{ср}}^2 n_{\text{нач}} + \left(\frac{n_0}{M_{\text{н}}} \right) M_{\text{с}}}{\frac{T_{\text{м}}}{\Delta t} + \left(\frac{1}{2} \frac{R_{\text{н}}}{r_{\text{д}}} \frac{1}{\Phi_{\text{н}}^2} \right) \Phi_{\text{ср}}^2}. \quad (2-28)$$

Здесь

$$T_m = \frac{J}{9,55} \frac{n_0}{M_n} \quad (2-29)$$

— *механическая постоянная времени*, представляющая собой время, необходимое для ускорения вхолостую ($M_c = 0$) привода с моментом инерции J при номинальном моменте двигателя M_n до частоты вращения идеального холостого хода n_0 .

Механическая постоянная времени для собственно якоря двигателя меняется в малых пределах; так, для двигателей мощностью от 0,5 до 1000 кВт $T_m \approx 0,5 \div 1$ с.

Для всего привода, т. е. якоря и механизма вместе, согласно (2-29) механическая постоянная времени увеличится пропорционально моменту инерции J .

Здесь следует отметить, что в расчетах часто пользуются *электромеханической постоянной времени*:

$$T_{э.м} = \frac{J}{9,55} \frac{n_0 r_{д*}}{M_n} = T_m r_{д*}, \quad (2-29')$$

которая представляет собой, как видно из равенства, время, необходимое для ускорения привода вхолостую ($M_c = 0$) с моментом инерции J при номинальном моменте двигателя M_n до частоты вращения, равной падению частоты вращения ($n_0 r_{д*}$) на естественной характеристике при номинальном моменте. Эта постоянная времени удобна при пользовании показательными функциями, аналогичными (3-80) в § 3-10.

Таким образом, в динамике электропривода мы пользуемся тремя постоянными времени, каждая из которых удобна в своей области расчетов. Этими постоянными времени являются:

$T_{э}$ — электромагнитная динамическая постоянная времени (2-24);

T_m — механическая постоянная времени (2-29);

$T_{э.м}$ — электромеханическая постоянная времени (2-29').

Напишем (2-28) в относительных значениях, причем, поскольку в расчетах мы будем пользоваться универсальными кривыми изменения потока во времени, заменим $\Delta t = T_{э.н} \Delta t_{пр}$, где $T_{э.н}$ — истинная электромагнитная постоянная времени обмотки двигателя в ненасыщенной части кривой намагничивания, а $\Delta t_{пр}$ — приращение приведенного времени при электромагнитной постоянной времени 1 с согласно универсальным кривым изменения потока во

времени (рис. 2-16). Формула (2-28) напишется в относительных значениях:

$$\Delta n_* = \frac{\frac{1}{r_{д*}} \Phi_{ср*} - \frac{1}{r_{л*}} (\Phi_{ср*})^2 n_{нач*} + M_{с*}}{\frac{T_m}{T_{э.н}} \frac{1}{\Delta t_{пр}} + \frac{1}{2r_{л*}} (\Phi_{ср*})^2} \quad (2-28')$$

Задаваясь небольшими временами $\Delta t_{пр}$, по рис. 2-16 найдем средние значения потока $\Phi_{ср}$ и, зная для рассматриваемого привода M_c , T_m и $T_{э.н}$, можем определить по (2-28') соответствующие приращения частоты вращения Δn_* .

Из (2-28') вытекает очень важный закон: зависимость от потока частоты вращения двигателя, э. д. с., тока якоря и момента определяется не абсолютными значениями $T_{э.н}$ и T_m , а их отношением. Изменение же во времени потока будет, естественно, зависеть от абсолютного значения $T_{э.н}$. Благодаря этому закону можно построить переходные характеристики, справедливые для бесчисленного количества условий.

При помощи формулы (2-28') и табл. 2-3 рассчитаны и построены на рис. 2-17 кривые частоты вращения, э. д. с., тока и момента двигателя во времени для случая ускорения потоком до двойной частоты вращения при реактивном статическом моменте. Эти кривые справедливы для $T_{э.н}/T_m = 2$ и любых $T_{э.н}$ с пропорционально измененным масштабом времени.

Нами предложено понятие «динамические характеристики двигателей», дающее зависимость частоты вращения двигателя от момента или тока якоря в переходных режимах. Время, являющееся аргументом в переходных режимах,

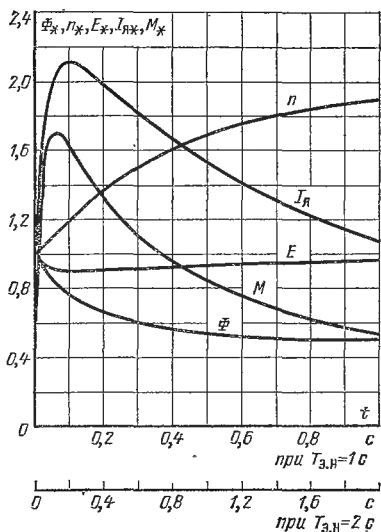


Рис. 2-17. Кривые Φ , n , E , I_a , $M = f(t)$ при ускорении двигателя параллельного возбуждения до 2-кратной частоты вращения ослаблением потока при $M_c = -0,5$, $T_{э.н}/T_m = 2$ и $T_{э.н} = 1$ и 2 с.

Расчет кривых n , E , I_a , $M = f(t)$ ускорения двигателя ослаб
[к рис. 2-17 и 2-18,
Величины Φ , n , E , I_a , M даны

Из кривой рис. 2-16 ($\Phi_y = 0,5$) при $T_{э.н} = 1$ с		$\Phi_{ср}$	$\Delta t_{пр}, \text{с}$ ($T_{э.н} = 1$ с)	$\frac{1}{r_d} \Phi_{ср}^2$	$\frac{1}{r_d} \Phi_{ср} = A$	$\frac{1}{r_d} \Phi_{ср}^2 n_{нач} = B$ ($n_{нач}$ из столбца 13)	$A - B + M_c$
$t_{пр}, \text{с}$	Φ						
0	1	—	—	—	—	—	—
0,03	0,90	0,950	0,03	18,04	19,00	17,59	0,91
0,06	0,83	0,865	0,03	14,96	17,30	15,11	1,69
0,1	0,763	0,796	0,04	12,68	15,93	13,70	1,73

Примечание. В таблице приведено для примера только несколько

здесь исключено. Исключение времени позволяет строить семейства универсальных характеристик двигателей параллельного возбуждения в переходных режимах при регулировании полем.

На рис. 2-18 даны динамические характеристики «ток якоря — частота вращения» двигателя для случаев ускорения от 1-кратной частоты вращения до 2-кратной и 3-кратной, от 2-кратной до 3-кратной и от 3-кратной до 4-кратной. Кривые построены для разных статических моментов M_c и разных отношений $T_{э.н}/T_m$. Кривые дают возможность для реальных практических случаев увидеть путем сравнения, какой будет динамическая характеристика.

Необходимо обратить внимание на то, что для удобства пользования кривыми нами принята всюду $T_{э.н}$ только для собственно обмотки возбуждения, но динамические характеристики, естественно, рассчитаны с учетом насыщения и при наличии последовательных резисторов, отвечающих частотам вращения $n = 1, 2, 3$ и 4.

Пунктиром показана кривая допускаемых токов якоря. Сопоставляя динамические характеристики ускорения с кривой допускаемых токов, можно видеть, насколько активно происходит переходный процесс, а также решать вопросы о потребном количестве ступеней ускорения.

Как известно, графики во времени переходного процесса электропривода рассчитываются по трем параметрам: ста-

лением потока $\Phi = 1 \rightarrow 0,5$, $M_{с*} = -0,5$, $T_{э.н}/T_m = 2$, $r_{д*} = 0,05$
формула (2-28').

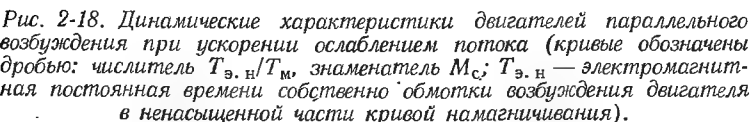
в относительных значениях

$\frac{T_m}{T_{э.н}} \times \frac{1}{\Delta t_{пр}}$	$\frac{1}{r_d} \Phi_{ср}^2 = C$	$\frac{T_m}{T_{э.н}} \frac{1}{\Delta t_{пр}} + C = D$	$\Delta n = \frac{A - B + M_c}{D}$	$n = n_{нач} + \Delta n$	$E = \Phi n$	$I_y = \frac{I - E}{r_d}$	$M = \Phi I_y$
—	—	—	—	0,975	0,975	0,5	0,5
16,67	9,02	25,687	0,0351	1,010	0,909	1,82	1,64
16,67	7,48	24,147	0,0700	1,080	0,897	2,06	1,71
12,50	6,34	18,84	0,0919	1,172	0,894	2,12	1,62

начальных строчек расчета.

тическому моменту, моменту инерции и электромагнитной постоянной времени; динамические же характеристики рассчитываются всего лишь по двум параметрам: статическому моменту и отношению электромагнитной постоянной времени к механической постоянной времени. Благодаря введению отношения $T_{э.н}/T_m$ любая динамическая характеристика, показанная на рис. 2-18, охватывает бесконечно большое число случаев с разными электромагнитными и механическими постоянными времени, но при данных их отношениях.

На основании динамических характеристик рис. 2-18 можно заключить, что для управления ускорением двигателя потоком ступени частоты вращения должны быть неодинаковые и, чтобы пики токов якоря получались на грани допускаемых, нужно первую ступень повышения частоты вращения делать наибольшей и последующие уменьшать. Из этих характеристик также видно, что статический момент M_c играет малую роль, а отношение $T_{э.н}/T_m$ большую. Так, для ускорения от номинальной до двойной частоты вращения ($n_* = 1 \rightarrow 2$) увеличение $M_{с*}$ в 5 раз (кривые $\frac{4}{-0,1} \div \frac{4}{-0,5}$) дает меньший рост тока, чем уменьшение $T_{э.н}/T_m$ только в 2 раза (кривые $\frac{4}{-0,1} \div \frac{2}{-0,1}$).



Из семейства динамических характеристик можно сделать много практических выводов; например, можно видеть, что для широко распространенных случаев, когда механическая постоянная времени привода равна около 1 с, двигатели серий ПН и П, имеющие малую электромагнитную постоянную времени 0,3—1,2 с, не могут ускоряться в одну ступень до двойной частоты вращения даже вхолостую (кривая $\frac{1}{-0,1}$), так как ток якоря превосходит допустимый, тогда как краново-металлургические двигатели серий МП, ДП и Д, обладающие большими электромагнитными постоянными времени (3—4 с), могут ускоряться в одну ступень даже до 3-кратной частоты вращения (кривая $\frac{4}{-0,1}$).

Динамические характеристики «момент — частота вращения» нетрудно представить на основании характеристик «ток якоря — частота вращения», помня, что момент двигателя пропорционален потоку и току якоря. В табл. 2-3 дано также определение моментов двигателя.

На рис. 2-19 приведены динамические характеристики двигателей параллельного возбуждения при замедлении усилением потока. Из сравнения кривых рис. 2-18 и 2-19 следует, что для одинаковых пределов изменения частоты вращения и при одинаковых значениях $T_{a.m}/T_m$ и M_c максимальные токи при замедлении получаются меньше, чем при ускорении.

Можно также видеть, что если при ускорении максимальные токи тем больше, чем больше статический момент (знаменатель дроби у кривых), то при замедлении они становятся меньше с увеличением статического момента.

Это объясняется тем, что принятый в расчете отрицательный статический момент противодействует ускорению и способствует замедлению.

Обращаем внимание, что динамические характеристики рис. 2-18 и 2-19 рассчитаны для сопротивления двигателя $r_* = 0,05$. Для двигателей с меньшим сопротивлением максимальные токи получатся больше, а с большим сопротивлением — меньше. Так, для двигателей с внутренним сопротивлением $r_{л*} = 0,02$ получатся токи больше приблизительно на 25%, а двигателей с $r_{л*} = 0,08$ меньше приблизительно на 15% номинальных.

При расчете динамических характеристик нельзя не учитывать влияние вихревых токов. Известно, что при усилении или ослаблении потока наводятся вихревые токи

в массивных частях магнитной системы: в полюсах и ярме. Магнитодвижущая сила от этих токов всегда направлена так, что она препятствует изменению потока: если поток растет, она направлена против м. д. с. полюсов и замедляет рост потока, если поток падает, она направлена согласно

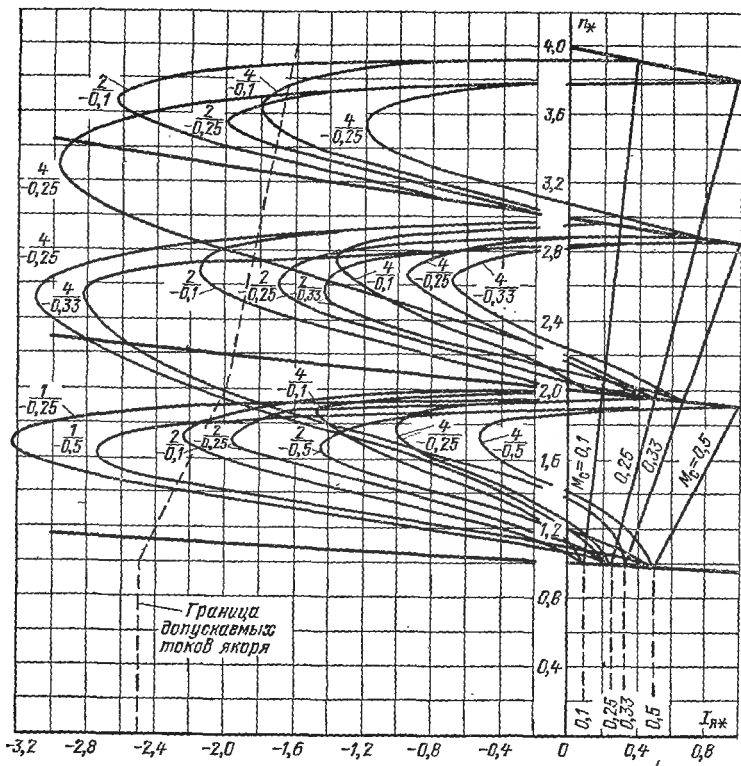


Рис. 2-19. Динамические характеристики двигателей параллельного возбуждения при замедлении усилением потока (кривые обозначены дробью: числитель $T_{э.н}/T_m$, знаменатель $M_{с*}$).

м. д. с. полюсов и стремится задержать существующий поток. Таким образом, вихревые потоки замедляют изменение потока как при его росте, так и при спадании.

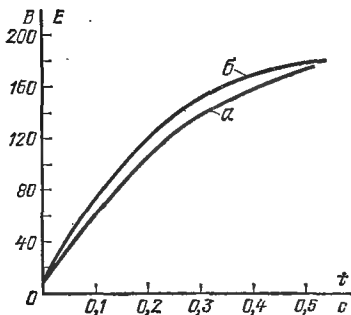
Влияние вихревых токов можно учитывать в виде добавочной м. д. с. к основной, считая, что поток определяется равнодействующей м. д. с. от тока возбуждения главных

полюсов и вихревых токов. Этот способ приводит к очень сложным расчетам, так как при нем нельзя рассматривать самостоятельно изменение потока во времени.

Для практических расчетов удобнее учитывать влияние вихревых токов увеличением электромагнитной постоянной времени. Сравнение опытных кривых нарастания и спада потока во времени и расчетных без учета вихревых токов показывает, что для нормальных машин средней мощности с шихтованными полюсами и сплошным ярмом электромагнитная постоянная времени увеличивается от действия вихревых токов при приложении к обмотке возбужде-

Рис. 2-20. Кривые нарастания во времени э. д. с. якоря двигателя параллельного возбуждения типа МП-22, 220 В, 4,5 кВт.

а — со сплошной станиной (опытная) и б — с шихтованной станиной (расчитана по опытным параметрам).



ния полного напряжения или при замыкании накоротко возбужденной обмотки приблизительно в 1,2 раза, т. е.

$$T_{э. \text{ вихр}} \approx 1,2 T_{э}. \quad (2-30)$$

Этот коэффициент растет с уменьшением $T_{э}$ цепи обмотки возбуждения при введении добавочного резистора.

В последнее время имеется стремление изготавливать крупные двигатели постоянного тока для реверсивных прокатных станов с шихтованными полюсами и ярмом (рис. 2-20). Для этих двигателей можно не учитывать ничтожно малое увеличение электромагнитной постоянной времени от вихревых токов. Шихтование полюсов и ярма улучшает коммутацию двигателей при толковых токах благодаря уменьшению запаздывания потока добавочных полюсов.

Заметим, что применяемые в двигателях параллельного возбуждения стабилизирующие обмотки, размещаемые на главных полюсах, также оказывают демпферное действие на магнитный поток и увеличивают электромагнитную постоянную времени. Стабилизирующие обмотки образуют контур взаимной индукции, замкнутый через внешнюю сеть.

Демпфирующее свойство стабилизирующей обмотки требует изучения.

Пример 2-6. Определить сопротивление реостата и проверить возможность ускорения в одну ступень с номинальной до 2-кратной частоты вращения двигателя параллельного возбуждения типа МП-42, 16 кВт, 220 В, 700/1400 об/мин, $I_{я.н} = 84$ А, номинальный ток возбуждения $I_H = 1,97$ А, номинальный поток $\Phi_H = 0,0176$ Вб, $2p = 4$, число витков одного полюса $w = 1500$, сопротивление параллельной обмотки $r_{пар} = 81$ Ом при 20°C , $r_{я.п*} = 0,08$, $J_{я} = 0,95$ кг·м². Двигатель приводит механизм с моментом $M_c = 120$ Н·м, $J_m = 0,625$ кг·м².

Решение. Сопротивление параллельной обмотки возбуждения при расчетной допустимой температуре 120°C равно:

$$r_{пар120} = r_{пар20} \frac{1 + 0,004 \cdot 120}{1 + 0,004 \cdot 20} = 81 \cdot 1,38 = 112 \text{ Ом.}$$

Сопротивление добавочного невыключаемого резистора

$$r_{доб} = \frac{U_H}{I_H} - r_{пар120} = \frac{220}{1,97} - 112 = 0,$$

т. е. добавочный невыключаемый резистор не требуется.

Для получения 2-кратной частоты вращения нужно поток уменьшить до 0,5 номинального, а ток возбуждения по кривой намагничивания рис. 2-14 уменьшить до

$$i_* = 0,28,$$

т. е.

$$i = i_* i_H = 0,28 \cdot 1,97 = 0,55 \text{ А.}$$

Требуемое по условию сопротивление реостата получится исходя из того, что 2-кратную частоту вращения нужно получить и при холостой обмотке возбуждения:

$$r_{реост} = \frac{U_H}{I} - r_{пар20} = \frac{220}{0,55} - 81 = 319 \text{ Ом.}$$

Для проверки возможности ускорения в одну ступень воспользуемся динамическими характеристиками рис. 2-18, для чего определим $M_{с*}$, T_m и $T_{э.н.}$

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{n_H} \cdot 9550 = \frac{16}{700} 9500 = 218 \text{ Н·м.}$$

Относительный статический момент:

$$M_{с*} = \frac{M_c}{M_H} = \frac{120}{218} = 0,55.$$

Механическая постоянная времени пр (2-29):

$$T_m = \frac{J}{9,55 M_H} n_0 = \frac{J_{я} + J_m}{9,55} \frac{n_H}{1 - r_{л*}} = \frac{0,95 + 0,625}{9,55} \frac{700}{1 - 0,08} = 0,575 \text{ с.}$$

Электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения по формуле (2-24):

$$T_{\Sigma} = \frac{2p\omega}{r_{\text{пар}}} k_s \frac{d\Phi}{dI} = \frac{2p\omega}{r_{\text{пар}}} k_s \frac{\Phi_{\text{п}} d\Phi_{*}}{I_{\text{н}} dI_{*}}.$$

По кривой намагничивания рис. 2-14 имеем $d\Phi_{*}/dI_{*} = 1,7$ для ненасыщенной части, поэтому

$$T_{\Sigma. \text{н}} = \frac{4 \cdot 1500}{112} 1,15 \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{1,97} 1,7 = 0,94 \text{ с.}$$

С учетом вихревых токов

$$T_{\Sigma. \text{н. вихр}} \approx 1,2 T_{\Sigma. \text{н}} = 1,2 \cdot 0,94 = 1,13 \text{ с;}$$

$$\frac{T_{\Sigma. \text{н. вихр}}}{T_{\text{м}}} = \frac{1,13}{0,575} = 1,97.$$

Сравнивая эти данные ($n=1; 2, \frac{T_{\Sigma. \text{н}}/T_{\text{м}}}{M_{\text{с*}}} = \frac{1,97}{0,55}$) с данными характеристик рис. 2-18, можно сказать, что динамическая характеристика рассматриваемого двигателя будет немного правее динамической характеристики, обозначенной $\frac{2}{0,5}$, имеющей максимальный момент, меньший, чем допускаемый (см. пункт).

Таким образом, двигатель допускает ускорение с одной ступенью ослабления потока.

2-7. ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕ

1. РЕЖИМ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

Противовключением называется генераторный режим двигателя, при котором он вращается в направлении, противоположном тому, для которого включены его обмотки.

Рассмотрим способы получения противовключения и режимы двигателей.

Перетягивающий груз. Представим себе двигатель с последовательным резистором в цепи якоря, соединенный с барабаном, на который намотан канат и подвешен груз G (рис. 2-21).

Если статический момент от груза равен M_a , то включенный в сеть двигатель в направлении подъема ускорит барабан до установившейся частоты вращения в точке A своей характеристики. В этой части характеристики двигатель работает в двигательном режиме и приложенное напряжение сети уравнивается противоположно направленными ему э. д. с. якоря и падением напряжения во всей силовой цепи двигателя. Ток двигателя равен:

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}} - E}{R}.$$

Если теперь увеличить груз так, чтобы статический момент стал равным M_b , то двигатель замедлится по характеристике AB и остановится в точке B , удерживая груз неподвижно. При этом якорь не генерирует э. д. с. и ток равен:

$$I_a = U_n / R.$$

При дальнейшем увеличении груза он начнет опускаться, перетягивая двигатель и вращая его в направлении, противоположном тому, которое он имел бы, если бы был предоставлен самому себе. Мы получим режим противовключения.

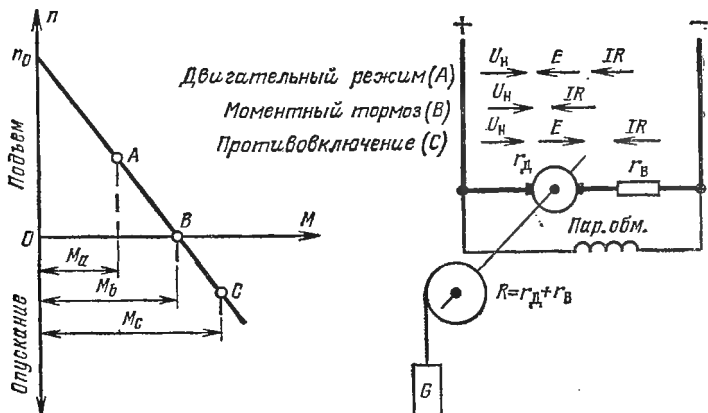


Рис. 2-21. Получение противовключения перетягивающим грузом.

ния. Если статический момент от груза сделать равным M_c , то устойчивая частота вращения получится в точке C характеристики двигателя. Поскольку полярность магнитного поля осталась прежней, а якорь вращается в обратную сторону, его э. д. с. изменит направление и станет согласной приложенному напряжению сети. Таким образом, в режиме противовключения ток в двигателе получается от суммы напряжения сети и э. д. с. якоря

$$I_a = \frac{U_n + E}{R},$$

а не разности, как в случае двигательного режима.

Здесь уместно дать общие признаки двигательного и генераторного режимов: в двигательном режиме ток двигателя направлен встречно э. д. с., а в генераторном режиме ток двигателя направлен согласно э. д. с.

Для более ясного представления режима противовключения предположим, что генератор сети имеет только одну нагрузку — рассматриваемый двигатель. Тогда в режиме противовключения двигателя получим как бы два генератора, работающих последовательно на одно общее внешнее сопротивление, т. е. в режиме противовключения двигателя постоянного тока во внешнем последовательно включенном резисторе расходуется мощность двигателя, преобразующего механическую энергию привода в электрическую, и добавочная мощность из сети. Это обстоятельство является отрицательным, поскольку мы не можем не только использовать энергию, отдаваемую приводом, но, кроме того, еще забираем энергию из сети.

На практике рассмотренным методом получения противовключения от перетягивающей нагрузки пользуются для опускания грузов на кранах с простейшим управлением, при этом превышение статического момента над моментом двигателя, когда он неподвижен, получают введением добавочных ступеней резистора в цепи якоря.

Переключение вращающегося якоря. Режим противовключения можно еще получить, если при работе двигателя переключить его якорь. Благодаря кинетической энергии привода якорь будет продолжать вращаться в том же направлении и, следовательно, сохранит направление э. д. с., но она будет теперь направлена в силовой цепи не против напряжения сети, как в предшествующем двигательном режиме, а согласно ему.

Ток якоря станет согласным э. д. с., т. е. изменит направление; изменит направление и момент, который будет тормозить привод.

Под действием напряжения сети и э. д. с. якоря в силовой цепи получится очень большой ток, если даже ввести все ступени пускового резистора. Действительно, если при трогании двигателя ток, определяемый одним напряжением сети и сопротивлением пускового резистора, был, например, 2-кратным, то при противовключении с номинальной частоты вращения, когда э. д. с. якоря почти равна приложенному напряжению, получится почти 4-кратный ток.

Такой большой ток не может быть допущен для двигателя, и чтобы его ограничить до допустимого, примерно такого же, как пусковой, вводится *ступень противовключения*. Реле и контактор, управляющие этой ступенью, называются *реле противовключения и контактор противовключения*.

с полным сопротивлением пусковых ступеней резистора и противовключения.

Полученный ток вызовет падение напряжения в сопротивлении пускового резистора, что заставит втянуться реле ускорения $1PY$ и $2PY$, которые разомкнут свои контакты в цепях катушек контакторов ускорения $1Y$, $2Y$, отключив их от отрицательного полюса.

Реле противовключения отрегулированы так, что падение напряжения от этого тока в силовой цепи двигателя между точками присоединения реле достаточно для их

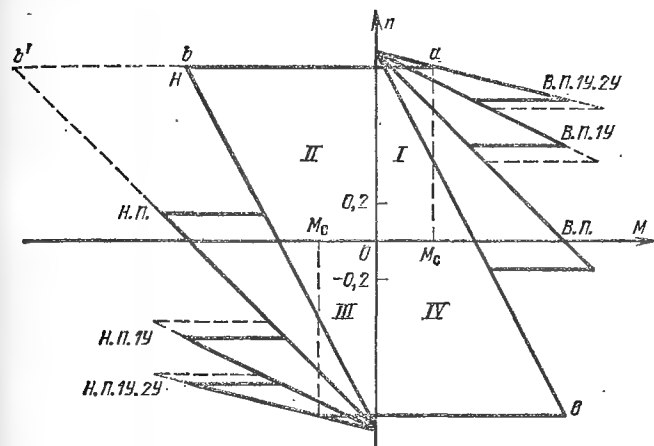


Рис. 2-23. Механические характеристики пусковые и противовключения для двигателя параллельного возбуждения, управляемого по схеме рис. 2-22.

втягивания, поэтому реле $РПВ$ втянется немедленно, замкнет свой замыкающий контакт и возбudit катушку контактора Π .

Последний закоротит ступень противовключения, отчего возрастут ток и момент двигателя, привод тронется с места и начнет ускоряться (рис. 2-23).

На реле $РПВ$ окажется полное напряжение сети, а потому оно останется втянутым во всем двигательном режиме. Замыкание контактора Π вызовет закорачивание катушки реле $1PY$, оно выпадет с выдержкой времени, включив первый контактор ускорения $1Y$, который переведет двигатель на следующую искусственную характеристику ускорения. Аналогичным образом замыкание контактора $1Y$ вызовет закорачивание катушки реле $2PY$, которое включит второй кон-

тактор ускорения $2У$, в результате чего двигатель перейдет на естественную характеристику и ускорится до частоты вращения в точке a , соответствующей статическому моменту привода. Допустим, что когда двигатель вращался с номинальной частотой вращения в направлении «вперед», командоконтроллер быстро перевели в положение «назад». При переходе командоконтроллера через нулевое положение контакторы ($Л$, $1В$, $2В$, $П$, $1У$, $2У$) и реле противовключения $РПВ$ потеряют возбуждение и разомкнутся, потеряют возбуждение также и реле ускорения $1РУ$, $2РУ$. Контакт $Л$ снова замкнется и одновременно с ним замкнутся контакторы направления $1Н — 2Н$. Таким образом, в силовую цепь двигателя будут введены все ступени пускового резистора, а якорь переключен. Поскольку э. д. с. якоря станет согласной приложенному напряжению, мы получим режим противовключения. Двигатель перейдет в точку b своей искусственной характеристики. Если бы не было ступени противовключения, то пик тока и момента определялся бы точкой b' .

Одновременно на силовую цепь двигателя окажется подключенным реле противовключения $РПН$, но оно не втянется и не замкнет свой контакт до тех пор, пока частота вращения двигателя не замедлится до определенного значения. Это объясняется следующим: напряжение на катушке реле противовключения при полностью введенном пусковом резисторе, как следует из схемы, равно:

$$U_{РП} = U_n - I_{я} r_x, \quad (2-31)$$

где r_x — сопротивление силовой цепи двигателя между отрицательным полюсом сети и точкой присоединения реле противовключения.

Благодаря тому что в режиме противовключения э. д. с. якоря направлена согласно напряжению сети, получится значительный ток, который вызовет большое падение напряжения $I_{я} r_x$. При некоторых условиях оно может оказаться равным напряжению сети, тогда согласно (2-31) напряжение на реле противовключения будет равно нулю. Замедление двигателя сопровождается уменьшением э. д. с. якоря и, следовательно, спаданием тока в силовой цепи, вследствие чего падение напряжения $I_{я} r_x$ уменьшается, а напряжение на реле противовключения растет.

На рис. 2-24 дана примерная характеристика изменения напряжения на реле противовключения при торможении двигателя, из которой мы видим, что при 1-кратной частоте

вращения напряжение на реле противовключения равно нулю, а при неподвижном якоре равно $U_{РПО*} = 0,5$.

При замедлении двигателя, когда частота вращения его станет равной $n_* = 0,2$, напряжение на реле противовключения станет равным напряжению втягивания $U_{РП} = U_{ВТ}$, вследствие чего оно втянется, замкнет свой контакт и включит катушку контактора Π , который в свою очередь закоротит

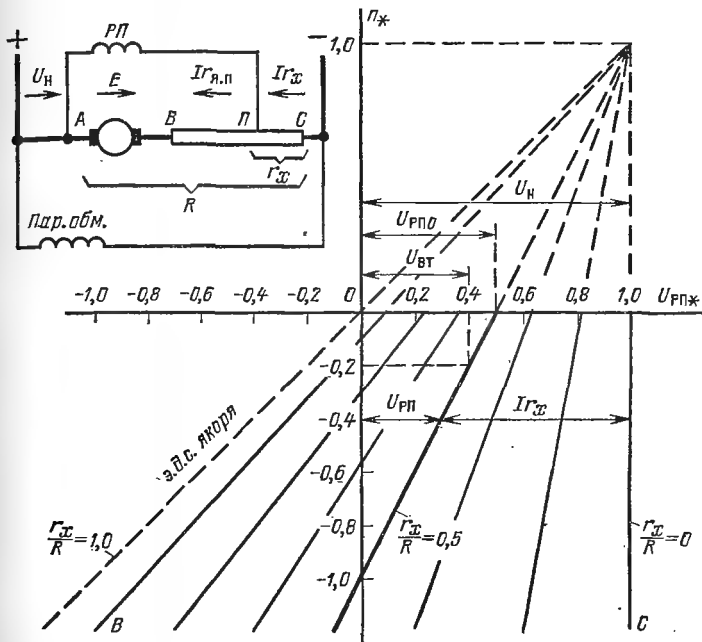


Рис. 2-24. Характеристики напряжения на катушке реле противовключения в функции частоты вращения для различных точек присоединения его к резистору в цепи якоря двигателя параллельного возбуждения.

тит ступень противовключения. Момент двигателя возрастет, отчего двигатель быстро замедлится до нуля частоты вращения и, не задерживаясь в этом положении, станет ускоряться в направлении «назад». Далее с выдержками времени будут последовательно выпадать реле ускорения.

Хотя реле противовключения втянулось и замкнуло свой контакт при частоте вращения $n_* = 0,2$, переход с одной характеристики противовключения на другую, как видно из рис. 2-23, осуществится для данного привода

при меньшей частоте вращения; это объясняется запаздыванием работы контактора из-за собственного времени втягивания.

Начало счета времени первого реле ускорения $1PУ$ определяется закрытием главных контактов контактора $П$, что происходит при нуле частоты вращения, когда двигатель пускается, и при некоторой отрицательной частоте вращения, когда он реверсируется. Поэтому время на первой кривой ускорения при реверсе получится меньше, чем при пуске из состояния покоя, и как следствие контактор $1У$ замкнется при меньшей частоте вращения. Поскольку начало счета времени второго реле ускорения $2PУ$ определяется замыканием контактора $1У$, то и контактор $2У$ замкнется также при меньшей частоте вращения. В результате этого пики тока и момента двигателя после его реверса получатся большими, как показано пунктиром, чем при пуске из состояния покоя, как показано сплошными линиями (рис. 2-23). Такой режим имеет место только в случае управления ускорением в функции времени; при ускорении в функции тока или э. д. с. пики тока и момента получаются одинаковыми независимо от того, какое состояние двигателя предшествовало ускорению.

Очевидно, что характеристики в квадрантах II и III одинаковы с таковыми в квадрантах IV и I и лишь повернуты на 180° относительно первых. Для того чтобы не чертить два одинаковых комплекта характеристик, в дальнейшем мы будем объединять одинаковые квадранты, т. е. будем показывать характеристики только в квадрантах I и IV .

Возвращаясь к реле противовключения, необходимо отметить, что уставка напряжения втягивания его с нагретой катушкой должна быть по крайней мере на 20% меньше напряжения, которое получается при неподвижном якоре и полном сопротивлении в силовой цепи (рис. 2-24), т. е.

$$U_{вт} = 0,8U_{РПО}. \quad (2-32)$$

Это необходимо для надежного втягивания реле при пуске двигателя, чтобы учесть возможное падение напряжения в сети, неравномерное изменение сопротивления силовой цепи от нагрева, неточность изготовления и подбора ступеней резистора, отклонения уставки реле и некоторый запас.

Для того чтобы реле противовключения втягивало при меньшей отрицательной частоте вращения и чтобы эта

частота вращения не сильно менялась, желательно так найти точку присоединения реле, чтобы характеристика $U_{\text{рп}} = f(n)$ была возможно полеже. Но тогда появляется опасность возникновения достаточно большого отрицательного напряжения на катушке реле при торможении двигателя с высокой частоты вращения. Реле втянется и вызовет закорачивание ступени противовключения; получится очень большой ток, который может привести к аварии двигателя. Исходя из указанных соображений, желательно рассчитывать точку присоединения реле противовключения так, чтобы в режиме торможения при максимально возможной частоте вращения иметь на реле противовключения нуль напряжения.

2. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТУПЕНИ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

При режиме противовключения

$$U_{\text{н}} + E = I_{\text{я}} (r_{\text{д}} + r_{\text{у}} + r_{\text{пр}}),$$

где $r_{\text{у}}$ — полное сопротивление ступеней ускорения (P2—P4); $r_{\text{пр}}$ — сопротивление ступени противовключения (P1—P2).

Подставляя вместо $I_{\text{я}}$ допускаемое его значение $I_{\text{доп}}$, вместо E — ее максимально возможное значение $E_{\text{макс}}$ и решая равенство относительно $r_{\text{пр}}$, получаем:

$$r_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{н}} + E_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} - (r_{\text{д}} + r_{\text{у}}), \quad (2-33)$$

где $U_{\text{н}}$, $r_{\text{д}}$, $r_{\text{у}}$ считаем известными.

Принимая максимальную частоту вращения равной частоте вращения идеального холостого хода, получаем $E_{\text{макс}} = U_{\text{н}}$.

Если сопротивление пускового резистора рассчитывается графическим способом, то одновременно можно построить желательную характеристику противовключения и при ее помощи определить сопротивление ступени противовключения, считая при номинальном моменте изменение скольжения равным относительно изменению внешнего сопротивления.

3. РАСЧЕТ ТОЧКИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ РЕЛЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЙ

Обозначим на схеме рис. 2-24 сопротивление между минусом сети и точкой присоединения реле противовключения через $r_{\text{х}}$. Нетрудно показать, что для двигателя

с постоянным полем характеристики изменения напряжения на реле противовключения в функции частоты вращения прямолинейны независимо от точки его присоединения.

На рис. 2-24 показано семейство характеристик $U_{\text{РП}} = f(n)$ для различных точек присоединения реле противовключения.

Все они сходятся в одной точке при $n_* = 1$, $U_{\text{РП}*} = 1$, так как при частоте вращения идеального холостого хода ток в силовой цепи равен нулю и, следовательно, нет падения напряжения в сопротивлении контура. Если реле присоединить к точке *С*, то на его катушке будет полное напряжение сети независимо от частоты вращения. Соответствующая характеристика на рис. 2-24 обозначена той же буквой. Если реле присоединить к точке *В*, то напряжение на нем будет изменяться по характеристике *В*, близкой к характеристике э. д. с. якоря и отличающейся от нее из-за падения напряжения в якоре и щетках. Все другие точки присоединения реле противовключения к добавочному резистору дадут характеристики, которые будут проходить между лучами *В* и *С*.

Найдем зависимость $U_{\text{РП}} = f(n)$ в общем виде, исходя из двигательного режима, когда э. д. с. *E* двигателя направлена против напряжения сети $U_{\text{н}}$:

$$U_{\text{РП}} = U_{\text{н}} - I r_x;$$

$$I = \frac{U_{\text{н}} - E}{R} = \frac{U_{\text{н}} - C_E \Phi n}{R} = (U_{\text{н}} - C'_E n) \frac{1}{R}.$$

Окончательно получим:

$$U_{\text{РП}} = U_{\text{н}} - (U_{\text{н}} - C'_E n) \frac{r_x}{R}, \quad (2-34)$$

или в относительных значениях

$$U_{\text{РП}*} = 1 - (1 - n_*) \frac{r_x}{R}. \quad (2-34')$$

Эта зависимость, как легко видеть, полностью выражает кривые рис. 2-24 как для двигательного режима (+*n*), так и для режима противовключения (−*n*).

При максимальной частоте вращения согласно (2-31) должно быть:

$$U_{\text{н}} - I_{\text{я}} r_x = 0,$$

откуда

$$r_x = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{я}}},$$

но

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}} + E_{\text{макс}}}{R},$$

поэтому

$$r_x = R \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{н}} + E_{\text{макс}}}. \quad (2-35)$$

Если за максимальную частоту вращения принять частоту вращения идеального холостого хода, при которой $E_{\text{макс}} = U_{\text{н}}$, то согласно (2-35) получим:

$$r_x = R/2. \quad (2-36)$$

Для обычных случаев, когда переход в режим противобключения осуществляется с естественной характеристики, (2-36) дает небольшой запас надежности против (2-35), притом эта формула проще и потому ею удобно пользоваться в практических расчетах.

Теперь после расчета точки присоединения реле противобключения определим, на какое напряжение втягивания оно должно быть отрегулировано. Выше было указано, что уставка напряжения втягивания $U_{\text{вт}}$ реле должна быть на 20% ниже напряжения на нем при неподвижном яоре, т. е.

$$U_{\text{вт}} = 0,8U_{\text{РПО}}, \quad (2-37)$$

но

$$U_{\text{РПО}} = U_{\text{н}} - I_{\text{я}} r_x = U_{\text{н}} - \frac{U_{\text{н}}}{R} r_x = U_{\text{н}} \left(1 - \frac{r_x}{R}\right).$$

Подстановкой получим окончательно:

$$U_{\text{вт}} = 0,8U_{\text{н}} \left(1 - \frac{r_x}{R}\right). \quad (2-38)$$

Принимая $U_{\text{РП}} = 0$ при частоте вращения идеального холостого хода, с учетом (2-36) получаем:

$$U_{\text{вт}} = 0,4U_{\text{н}}. \quad (2-39)$$

2-8. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. РЕЖИМ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ И СПОСОБЫ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

Динамическим торможением двигателя называется генераторный режим его, при котором механическая энергия преобразуется в электрическую и расходуется в замкнутом контуре, электрически не связанном с сетью.

Поясним режим динамического торможения на примере для двигателя параллельного возбуждения, управляемого по схеме рис. 2-25.

Если при работе двигателя разомкнуть контактор $\mathcal{L}$ и замкнуть T , как показано на левой схеме, якорь отключится от сети и к его щеткам подключится резистор r_T . Благодаря инерции привода якорь будет продолжать вращаться в магнитном поле и генерировать э. д. с., кото-

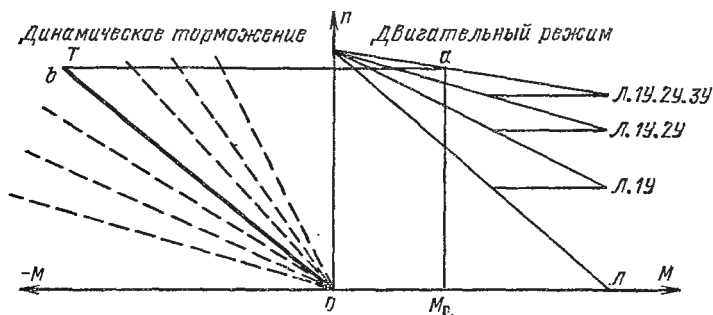
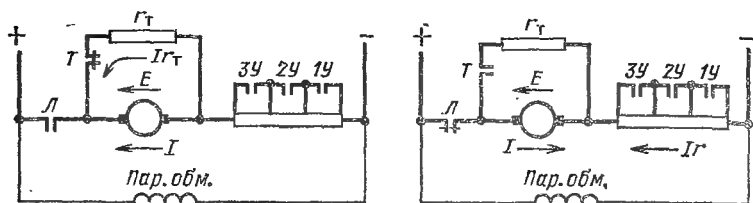


Рис. 2-25. Характеристики пусковые и динамического торможения для нерегулируемого двигателя параллельного возбуждения.

рая создаст в замкнутом контуре ток, ограничиваемый его сопротивлением $R_T = r_d + r_T$. Этот ток теперь будет направлен так же, как э. д. с., т. е. он изменит свое направление, а следовательно, изменит направление и момент, становясь противоположно направленным вращению двигателя. Таким образом, мы получим динамическое торможение. Якорь будет снижать свою частоту вращения и вместе с тем будут уменьшаться до нуля его э. д. с., ток и момент.

Очевидно, что при динамическом торможении запасенная в приводе кинетическая энергия частично израсходуется на механическую работу, а частично преобра-

зуется двигателем в электрическую энергию, которая затем превратится в тепло в сопротивлениях элементов замкнутого контура якоря. Из сети берется ток лишь для возбуждения двигателя.

Динамическое торможение применяется для быстрой и точной остановки приводов, требуемой технологией производства.

Быстрая остановка двигателя может понадобиться также для предотвращения аварии с машиной или с людьми или для предотвращения брака продукции.

Для некоторых приводов ставят только механические тормоза с соленоидным приводом, тормозящие силой пружин или грузов при обесточивании катушек. В других

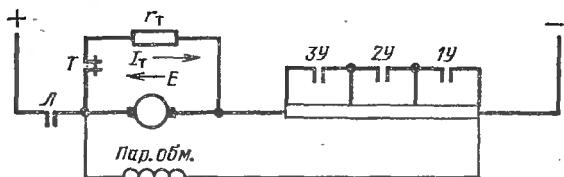


Рис. 2-26. Аварийное динамическое торможение двигателя параллельного возбуждения.

случаях этого недостаточно, и механическое торможение дополняют динамическим и часто применяют только одно динамическое торможение.

Аварийное торможение должно быть безотказным в работе. Оно должно быть эффективным даже в случае сгорания катушек контакторов или при внезапных падениях напряжения в питающей сети. Поэтому контакторы, создающие цепи динамического торможения, берутся с размыкающими главными контактами, а питание обмоток возбуждения двигателей в режиме торможения производится не от сети, а от самих двигателей.

На рис. 2-26 показана схема силовой цепи двигателя параллельного возбуждения, применяемая для аварийного динамического торможения, в которой обмотка возбуждения подключена за линейным контактором. Переход с двигательного режима на динамическое торможение получается размыканием замыкающих контактов контактора Л и замыканием размыкающих контактов контактора Т, при этом двигатель будет работать как генератор с самовозбуждением. При каждой остановке двигателя

отключается от сети его обмотка возбуждения, поэтому при пуске понадобится некоторое время для нарастания потока возбуждения до нормального значения. Как следствие в течение этого времени двигатель будет иметь несколько пониженный пусковой момент. Это является некоторым недостатком схемы, ограничивающим область применения ее только теми случаями, где нет особых требований к ускорению привода, но нужно иметь аварийное торможение.

При динамическом торможении с самовозбуждением по схеме рис. 2-26 поток падает медленно благодаря тому, что обмотка возбуждения практически закорачивается накоротко; кроме того, ток в обмотке возбуждения поддерживается э. д. с. якоря. Поэтому в тех случаях, когда динамическое торможение применяется для остановки привода в механизмах, момент инерции которых превосходит момент инерции якоря двигателя не более чем в несколько раз, можно приблизительно считать, что торможение происходит с постоянным потоком. Время торможения может быть рассчитано аналогично примеру 1-1 в § 1-1. Учитывая, что аварийное торможение происходит редко, можно допустить повышенные токи и получить повышенные тормозные моменты и таким образом до некоторой степени скомпенсировать потерю эффекта от спада тока.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ НЕРЕГУЛИРУЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ

На рис. 2-25 в правом квадранте показаны пусковые характеристики, а в левом — характеристики динамического торможения.

При данной величине статического момента двигатель ускорится до частоты вращения, соответствующей точке *a* его естественной характеристики.

Если теперь открыть контактор *Л* и мгновенно закрыть контактор *Т*, то двигатель перейдет в режим динамического торможения. Допустим, что сразу после переключения на динамическое торможение получился тормозной момент, соответствующий точке *b* во втором квадранте. Двигатель будет замедляться и при этом, как указывалось выше, будут падать его э. д. с., ток и момент.

Выведем зависимость изменения момента двигателя в функции частоты вращения при замедлении. В режиме

динамического торможения э. д. с. якоря создает ток в замкнутом контуре:

$$I_{\text{я}} = \frac{E}{r_{\text{я.п}} + r_{\text{т}}}.$$

Подставляя в это равенство значения $I_{\text{я}}$ и E , выраженные через момент и частоту вращения, получаем:

$$M = \frac{C_E C_M \Phi^2}{r_{\text{я.п}} + r_{\text{т}}} n.$$

Из этого выражения вытекает, что в режиме динамического торможения при любых сопротивлениях контура

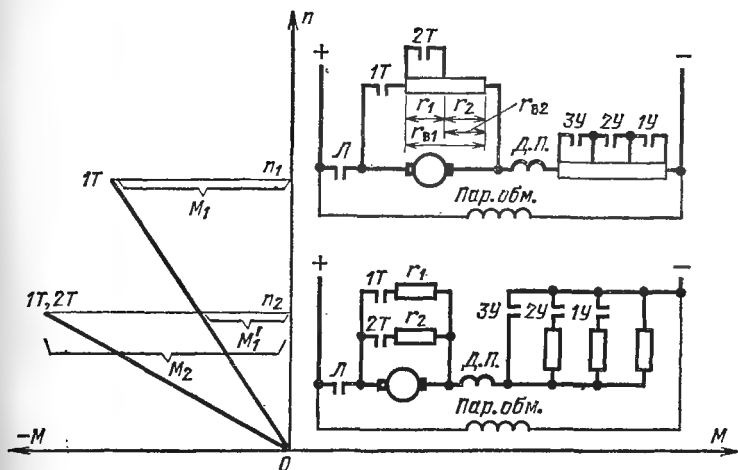


Рис. 2-27. Динамическое торможение в две ступени нерегулируемого двигателя параллельного возбуждения.

якоря все механические характеристики прямолинейны, пересекаются в одной точке, $n = 0$, $M = 0$ и тем ближе, чем меньше сопротивление контура. На рис. 2-25 сплошной линией показана характеристика динамического торможения с пиком момента, определяемым точкой b , а пунктирными — характеристики для различных сопротивлений добавочных резисторов. Поскольку при динамическом торможении остается полное поле, относительные моменты равны относительным токам.

Момент торможения сильно падает с уменьшением частоты вращения двигателя, следовательно, падает и эффективность торможения.

Для поддержания эффективности торможения в некоторых приводах уменьшают по ступеням сопротивление добавочного резистора, как показано на рис. 2-27.

Схема с последовательно соединенными секциями применяется обычно для двигателей малых и средних мощностей, а с параллельно соединенными секциями — для средних и крупных двигателей. При параллельном включении контакторов торможения они менее нагружены током, чем при последовательном, и благодаря этому могут быть выбраны меньшей величины.

Сравнение динамического торможения с противовключением дано в § 2-24.

3. ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО УМЕНЬШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

На практике в большинстве случаев применяется одна ступень динамического торможения и лишь в тех случаях, когда инерция привода велика, статический момент очень мал и требуется получить эффективное замедление, применяются две ступени и в редких случаях — больше двух.

Время и путь замедления привода в значительной мере зависят от частоты вращения двигателя, при которой производится ступенчатое уменьшение сопротивления добавочного резистора. Определим наиболее благоприятные частоты вращения уменьшения сопротивления резистора динамического торможения для двигателя с постоянным магнитным потоком.

Имея статический момент M_c и частоту вращения начала торможения n_1 , задаваясь пиками моментов M_1 и M_2 (рис. 2-27), определяем ту частоту вращения n_2 , при которой ступенчатое уменьшение сопротивления резистора динамического торможения даст минимальное время замедления привода. Время замедления определится по формуле

$$t_{n1-0} = t_{n1-n2} + t_{n2-0} = \left[\frac{J (n_2 - n_1)}{4,15 (M_1 - M'_1)} \lg \frac{M_1 + M_c}{M'_1 + M_c} \right] + \\ + \left[\frac{J}{4,15} \frac{(0 - n_2)}{M_2} \lg \frac{M_2 + M_c}{M_c} \right].$$

Выразим M'_1 через n_2

$$\frac{M'_1}{M_1} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ откуда } M'_1 = M_1 n_2 / n_1.$$

Подставим значение M_1' в первое равенство, затем возьмем из него производную по n_2 и приравняем к нулю, определим частоту вращения n_2 в явном виде:

$$n_2 = n_1 \left(\frac{1}{2,3 \frac{M_1}{M_2} \lg \frac{M_2 + M_c}{M_c}} - \frac{M_c}{M_1} \right), \quad (2-40)$$

при которой ступенчатое уменьшение сопротивления резистора динамического торможения дает минимальное время замедления.

Для некоторых приводов может требоваться не минимальное время замедления, а минимальный путь.

Полный путь замедления от частоты вращения n_1 до остановки определится:

$$S_{n1-0} = S_{n1-n2} + S_{n2-0}.$$

Берем первую производную и приравниваем ее к нулю; затем, пользуясь для пути S_{n1-n2} и S_{n2-0} формулой (1-17) и подставляя значения из рис. 2-27, получаем:

$$n_2 = n_1 \left(\frac{0,5}{\frac{M_1}{M_2} \left(1 - 2,3 \frac{M_c}{M_2} \lg \frac{M_2 + M_c}{M_c} \right)} - \frac{M_c}{M_1} \right). \quad (2-41)$$

Здесь n_2 — частота вращения ступенчатого уменьшения сопротивления резистора динамического торможения, при которой путь двигателя в оборотах получается минимальным. Рассматривая формулы минимального времени (2-40) и минимального пути (2-41), можем сказать, что частота вращения n_2 ступенчатого уменьшения сопротивления резистора динамического торможения не зависит от момента инерции привода, но зависит от отношения статического момента к пикам момента двигателя; кроме того, очевидно, что минимальное время и минимальный путь получаются не при одной частоте вращения.

Для большинства практических случаев, когда статический момент M_c составляет 0,1—0,5 пиков момента двигателя и $M_1 = M_2$, частота вращения ступенчатого уменьшения сопротивления резистора динамического торможения, соответствующая минимальному времени замедления, получается $n_2 = (0,3 \div 0,45) n_1$, а минимальному пути — $n_2 = (0,5 \div 0,65) n_1$. При этом меньшие частоты вращения соответствуют меньшим статическим моментам.

При динамическом торможении ток якоря в замкнутом контуре

$$I_{\text{я}} = \frac{E}{r_{\text{я.п}} + r_{\text{т}}}.$$

Подставляя вместо E максимально возможное значение $E_{\text{макс}}$ и вместо $I_{\text{я}}$ допускаемый ток $I_{\text{доп}}$ и решая равенство для $r_{\text{т}}$, получаем:

$$r_{\text{т}} = \frac{E_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я.п}}. \quad (2-42)$$

Считая торможение с частоты вращения идеального холостого хода, будем иметь:

$$E_{\text{макс}} = U_{\text{н}}. \quad (2-43)$$

Если требуется рассчитать сопротивление резистора динамического торможения с двумя ступенями, как на рис. 2-27, то вначале следует определить полное сопротивление резистора динамического торможения по (2-42):

$$r_{\text{в1}} = \frac{E_{\text{макс1}}}{I_{\text{доп1}}} - r_{\text{я.п}}, \quad (2-44)$$

затем сопротивление ступени резистора $r_{\text{в2}}$, которое останется в контуре после закорачивания первой ступени r_{1} :

$$r_{\text{в2}} = \frac{E_2}{I_{\text{доп2}}} - r_{\text{я.п}}. \quad (2-45)$$

Значение э. д. с. E_2 найдется по частоте вращения закорачивания первой ступени

$$E_{2*} = n_{2*},$$

которая может быть определена по (2-40) или (2-41) в зависимости от того, требуется ли получить минимальное время или минимальный путь замедления.

Сопротивление ступеней резистора динамического торможения определится при последовательном соединении (рис. 2-27, сверху):

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_{\text{в1}} - r_{\text{в2}}; \\ r_2 &= r_{\text{в2}}, \end{aligned} \right\} \quad (2-46)$$

при параллельном соединении (рис. 2-27, внизу):

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_{\text{в1}}; \\ r_2 &= \frac{r_{\text{в1}} r_{\text{в2}}}{r_{\text{в1}} - r_{\text{в2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (2-47)$$

Пример 2-7. Рассчитать сопротивление резистора динамического торможения в одну ступень для нерегулируемого двигателя типа МП-82, 100 кВт, 220 В, 475 об/мин, $I_{я.н} = 475$ А, $r_{я.н} = 0,01$ Ом.

Решение. Согласно § 1-2 можно допустить при номинальной частоте вращения пик тока $I_{доп*} = 2,5$, т. е.

$$I_{доп} = I_{доп*} I_{я.н} = 2,5 \cdot 475 = 1187 \text{ А.}$$

Сопротивление резистора динамического торможения по (2-42), считая $E_{\text{макс}} = U_{н}$, получаем:

$$r_{т} = \frac{U_{н}}{I_{доп}} - r_{я.п} = \frac{220}{1187} - 0,01 = 0,175 \text{ Ом.}$$

2-9. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для регулируемых двигателей параллельного возбуждения динамическое торможение может быть осуществлено двумя способами: 1) с ослабленным потоком; 2) с подачей полного потока.

Рассмотрим элементы схем и режимы двигателей для указанных двух способов при одной ступени динамического торможения, как показано на рис. 2-28.

Динамическое торможение с ослабленным потоком. Когда двигатель не работает, в цепь параллельной обмотки введено полное сопротивление регулирующего резистора, уменьшающее ток. При пуске двигателя вначале замкнутся оба контактора ускорения потоком 1УП — 2УП, отчего на параллельную обмотку дается полное напряжение.

Далее через установленные выдержки времени контакторы ускорения, закорачивая ступени пускового резистора, переводят двигатель на естественную характеристику.

После замыкания последнего контактора ускорения 3У и выхода двигателя на естественную характеристику разомкнутся с выдержками времени контакторы ускорения потоком 1УП, 2УП и введут в две ступени реостат. Двигатель будет продолжать ускоряться до частоты вращения, заданной положением ручки реостата.

Предположим, когда ручка реостата находилась в положении a и двигатель вращался с установившейся частотой вращения, разомкнулись все контакторы и замкнулся контактор T . В этом случае мы получим динамическое торможение с полным потоком, как и для нерегулируе-

мого двигателя. Сразу возникнет тормозной момент с пиком, обозначенным буквой a' , который будет падать при замедлении двигателя по прямолинейному закону. Теперь предположим, что до начала торможения ручка реостата находилась в положении b и двигатель вращался с установившейся частотой вращения, находясь в одноименной точке b характеристики. При данном добавочном резисторе в контуре якоря мы получим пик тока почти такой же, как и при торможении с частоты вращения a , но пик мо-

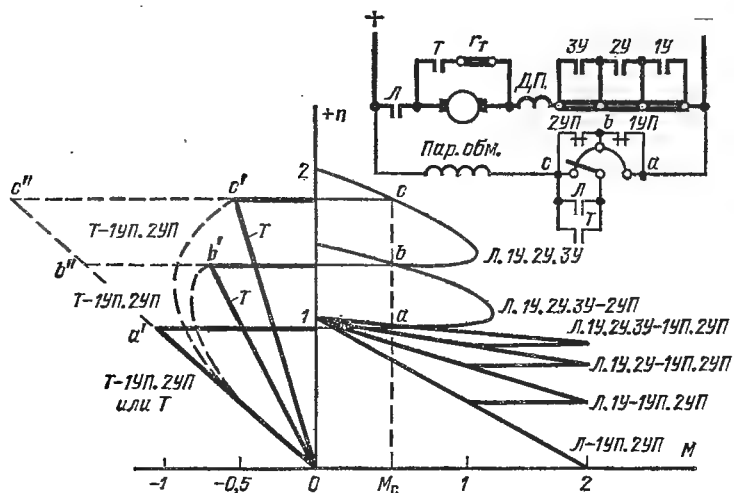


Рис. 2-28. Динамическое торможение регулируемого двигателя параллельного возбуждения.

мента получим, меньший во столько раз, во сколько уменьшен поток. При торможении с частоты вращения c мы получим опять почти тот же ток якоря, но момент будет еще меньше, так как эта частота вращения соответствует еще меньшему потоку. Механические характеристики двигателя при торможении с частот вращения b и c с ослабленным полем показаны на рис. 2-28 толстыми сплошными линиями $b'o$ и $c'o$.

Как уже отмечалось (рис. 1-5), чем выше частота вращения двигателя, тем меньший ток якоря может быть допущен; например, если при номинальной частоте вращения двигателя можно допустить 2,5-кратный ток, то при двойной частоте вращения — только 2-кратный. Имея в виду, что двойная частота вращения получится при по-

токе приблизительно 0,5 номинального, мы можем получить начальный момент всего лишь 1-кратный. По мере замедления двигателя момент его будет падать, и при номинальной частоте вращения мы будем иметь момент всего лишь 0,5 номинального. Чем большие пределы регулирования частоты вращения имеет двигатель, тем большее относительное сопротивление необходимо ввести в контур якоря для ограничения пика тока и тем меньший момент и меньшую эффективность торможения мы получим.

Динамическое торможение с подачей полного потока. Этот способ отличается от приведенного выше тем, что при переходе на динамическое торможение сразу замыкаются контакторы ускорения полем $1УП - 2УП$, которые закорачивают весь регулирующий резистор в цепи параллельной обмотки возбуждения.

Если бы поток возрастал мгновенно до полного значения, то пики тока и момента были бы пропорциональны частоте вращения и при торможении с частот вращения b и c они определялись бы соответственно точками b'' и c'' . Однако поток нарастает постепенно, вследствие чего начальные пики тока будут определяться э. д. с. якоря при ослабленном потоке, который был до начала торможения. Вместо пиков момента b'' и c'' мы получим b' и c' .

Далее будут идти одновременно два процесса: увеличение потока и замедление якоря, в результате чего момент двигателя будет изменяться по кривым (пунктирные кривые), приближаясь к характеристике полного поля $c''o$.

Вид характеристик $M = f(n)$ зависит от статического момента нагрузки, момента инерции всего привода и электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения.

Сглаживание пиков момента получается, естественно, тем больше, чем больше статический момент, чем меньше момент инерции и чем больше электромагнитная постоянная времени.

2. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ СТУПЕНЕЙ РЕЗИСТОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Динамическое торможение с ослабленным потоком. Сопротивление резистора динамического торможения в этом случае рассчитывается так же, как и в случае полного потока, по формуле (2-42), но допускаемый ток $I_{\text{доп}}$ здесь принимается разный в зависимости от начальной частоты вращения торможения (см. § 1-2 и рис. 1-5).

Динамическое торможение с подачей полного потока. Как и в случае ускорения ослаблением потока, при динамическом торможении с подачей полного потока мы будем рассматривать два последовательных явления: 1) нарастание потока во времени и 2) изменение частоты вращения, э. д. с., тока якоря и момента.

Способ расчета кривой нарастания потока во времени дан в § 2-6 в табл. 2-2, а сама кривая $\Phi = f(t)$ для $\Phi_{y*} = 1$ приведена на рис. 2-16.

Расчет * кривых n , E , I_a и $M = f(t)$ динамического тормо

$$\frac{T_{э.н}}{T_m} = 1, R_{T*} = r_{я.п*} + r_{T*} = 1$$

Величины Φ , n , E , I_a , M даны

По кривой рис. 2-16 ($\Phi_y = 1$) при $T_{э.н} = 1$ с		$\Phi_{ср}$	$\Delta t_{пр}, \text{ с}$ ($T_{э.н} = 1$ с)	$\frac{1}{R_T} \Phi_{ср}^2$	$\frac{-1}{R_T} \Phi_{ср}^2 n_{нач} =$ $= A (n_{нач} \text{ из}$ столбца 12)	$A + M_{ср} =$ $= A - 0,3$	$\frac{T_m}{T_{э.н}} \frac{1}{\Delta t_{пр}}$
$t_{пр}, \text{ с}$	Φ						
0	0,333**	—	—	—	—	—	—
0,1	0,462	0,397	0,1	0,158	—0,474	—0,774	10
0,2	0,58	0,521	0,1	0,272	—0,796	—1,096	10
0,3	0,68	0,63	0,1	0,397	—1,120	—1,420	10

* В таблице приведено для примера только несколько начальных строк

** Из кривой рис. 2-16 видно, что поток $\Phi_* = 0,333$ соответствует $t_{пр} =$ лени с $n_* = 3$.

Кривая нарастания потока показана для включения невозбужденной обмотки возбуждения на номинальное напряжение, но ею можно пользоваться и для усиления потока до номинального значения начиная с любого первоначального значения.

Для расчета кривых частоты вращения, э. д. с., тока якоря и момента двигателя во времени положим в основу (§ 2-6):

$$\Delta n = \frac{9,55}{J} M_{дн} \Delta t. \quad (2-48)$$

Будем считать выражение динамического момента в общем виде [равенство (1-1)]:

$$M_{дн} = M + M_c, \quad (2-49)$$

где момент двигателя:

$$M = C_m \Phi (-I_a) = -C_m \Phi \frac{E}{R_T} = -C_m \Phi \frac{C_E \Phi n}{R_T} = -\frac{C_m C_E}{R_T} \Phi^2 n.$$

Здесь $R_T = r_{я.п} + r_T$ — полное сопротивление контура динамического торможения.

У тока якоря добавлен знак минус потому, что в генераторном режиме двигателя ток меняет направление на обратное.

Таблица 2-4

жения с подачей полного поля $\Phi_* = 0,333 \rightarrow 1$, $M_{с*} = -0,3$,

[к рис. 2-29 и 2-30, формула (2-50)].

в относительных значениях

$\frac{1}{2R_T} \Phi_{ср}^2 = B$	$\frac{T_M}{T_{э.н}} \frac{1}{\Delta t_{пр}} + B = C$	$\frac{\Delta n = A + M_c}{C}$	$n = n_{нач} + \Delta n$	$\frac{E}{\Phi n}$	$\frac{I_a = E}{R_T}$	$\frac{M}{\Phi I_a}$
—	—	—	3	1	—1	—0,333
0,079	10,079	—0,0767	2,923	1,35	—1,35	—0,623
0,136	10,136	—0,108	2,82	1,63	—1,63	—0,946
0,1985	10,198	—0,139	2,68	1,82	—1,82	—1,24

расчета.
0,2 с. Это есть начало роста потока в рассматриваемом случае, т. е. при замед-

Подставляя это значение момента двигателя в равенство динамического момента (2-49), а последний в (2-48), получаем:

$$\Delta n = \frac{9,55}{J} \left(\frac{-C_m C_E}{R_T} \Phi^2 n + M_c \right) \Delta t.$$

Знак минус при числовом решении равенства говорит о том, что при динамическом торможении происходит не приращение частоты вращения, а убывание. Принимая малые времена Δt , будем считать переменные поток и частоту вращения в интервале Δt постоянными и равными средним значениям, т. е.

$$\Phi = \Phi_{ср} \quad \text{и} \quad n = n_{ср} = n_{нач} + \frac{\Delta n}{2}.$$

Здесь приращение Δn мы понимаем как алгебраическую величину. В расчете режима динамического торможения (табл. 2-4) приращение Δn получило знак минус.

Подставив эти величины в последнее равенство, после преобразований получим спадание частоты вращения:

$$\Delta n = \frac{-\frac{C_m C_E}{R_r} \Phi_{ср}^2 n_{нач} + M_c}{\frac{I}{9,55 \Delta t} + \frac{C_m C_E}{2 R_r} \Phi_{ср}^2}.$$

Заменяя $C_m = \frac{M_H}{\Phi_H I_{я.н}}$, $C_E = \frac{U_H}{\Phi_H n_0}$ и учитывая, что $\frac{U_H}{I_{я.н}} = R_H$, получаем окончательно (постоянные величины заключены в скобки):

$$\Delta n = \frac{-\left(\frac{R_H}{R_r} \frac{1}{\Phi_H^2}\right) \Phi_{ср}^2 n_{нач} + \left(\frac{n_0}{M_H}\right) M_c}{\frac{T_m}{\Delta t} + \left(\frac{1}{2} \frac{R_H}{R_r} \frac{1}{\Phi_H^2}\right) \Phi_{ср}^2}, \quad (2-50)$$

где $T_m = \frac{J}{9,55} \frac{n_0}{M_H}$ — механическая постоянная времени [см. (2-29)].

Заменим $\Delta t = T_{э.н} \Delta t_{пр}$, где $T_{э.н}$ — истинная электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения двигателя в ненасыщенной части кривой намагничивания, а $\Delta t_{пр}$ — приращение приведенного времени при электромагнитной постоянной времени 1 с согласно универсальной кривой нарастания потока во времени (см. рис. 2-16).

Формула (2-50) напишется в относительных значениях

$$\Delta n_* = \frac{-\frac{1}{R_{r*}} (\Phi_{ср*})^2 n_{нач*} + M_{c*}}{\frac{T_m}{T_{э.н}} \frac{1}{\Delta t_{пр}} + \frac{1}{2 R_{r*}} (\Phi_{ср*})^2}. \quad (2-50')$$

Формулу (2-50') можно получить также из формулы ускорения, если в (2-28') принять $U_H = 0$.

По (2-50') рассчитаны при помощи вспомогательной табл. 2-4 кривые частоты вращения, э. д. с., тока якоря и момента во времени (рис. 2-29) для случаев торможения с 3-кратной частоты вращения.

По данным табл. 2-4 построены динамические характеристики I_a и $M = f(n)$. На рис. 2-30 даны динамические характеристики $I_a = f(n)$ для торможения с 2, 3 и 4-кратной частот вращения, рассчитанные на основании универ-

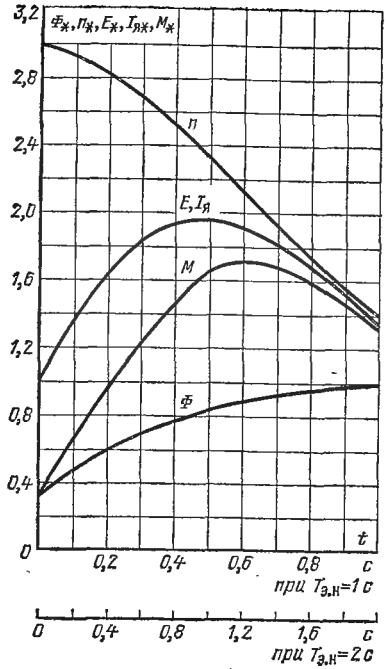
Рис. 2-29. Кривые Φ , n , E , $I_{я}$, $M = f(n)$ при динамическом торможении двигателя параллельного возбуждения с 3-кратной частоты вращения с подачи полного потока при $M_{с*} = -0,33$.

сальной кривой нарастания потока во времени рис. 2-16. Динамические характеристики даны для разных значений статического момента $M_{с*}$, отношений $T_{э.н}/T_m$ и полных сопротивлений цепи якоря R_T . Зная для любого конкретного случая $M_{с*}$, $T_{э.н}/T_m$ и R_T , можно видеть на рис. 2-30, какой вид будет иметь динамическая характеристика.

Для быстрого замедления необходимо выбирать такое сопротивление резистора R_T , при котором динамическая характеристика касается кривой допускаемых пиков тока (см. пунктир). Если динамическая характеристика выходит за границу допускаемых токов, необходимо увеличить сопротивление резистора R_T .

Случай торможения двигателей с высоких частот вращения необходимо проверять не только на допускаемый ток по коммутации, но еще и на максимальную э. д. с. двигателя. При малой электромагнитной постоянной времени двигателя и большой механической постоянной времени привода (т. е. малом отношении $T_{э.н}/T_m$) может возникнуть недопустимая э. д. с. вследствие быстрого нарастания потока и медленного снижения частоты вращения двигателя. Например, при торможении с 4-кратной частоты вращения по кривой $1/(-0,25)$ рис. 2-30 с начальным током $I_{я*} = 0,5$ (т. е. $R_{т*} = 2$), хотя получаемый при частоте вращения $n_* = 3,2$ максимальный ток $I_{макс*} = 1,5$ меньше допускаемого $I_{доп*} = 1,76$, якорь будет развивать э. д. с.

$$E_{макс*} = I_{макс*} R_{т*} = 1,5 \cdot 2 = 3,$$



т. е. 3-кратную номинальному напряжению, что недопустимо.

Для приведенного случая нельзя производить торможение с подачей полного потока, а нужно вначале осуществлять торможение с ослабленным потоком, который был до торможения, при сопротивлении резистора R_T , ограничивающем начальный пик тока до 1,6-кратного, допускаемого при 4-кратной частоте вращения. Затем

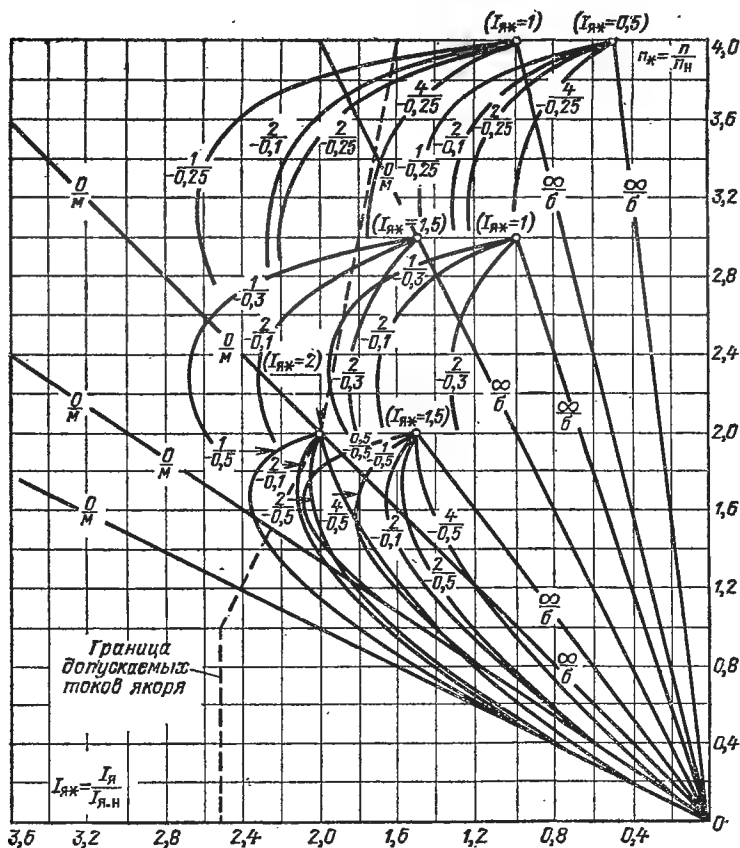


Рис. 2-30. Динамические характеристики динамического торможения двигателя параллельного возбуждения с подачей полного потока (кривые обозначены дробью: числитель $T_{э.п}/T_m$, знаменатель $M_{сж}/T_m$; буквы в знаменателях: «м» — малый, «б» — большой; $T_{э.н}$ — электромагнитная постоянная времени собственно обмотки возбуждения двигателя в ненасыщенной части кривой намагничивания).

после некоторого снижения частоты вращения двигателя можно подать полное напряжение на его обмотку возбуждения для получения полного потока и повышения тормозного момента.

Пример 2-8. Рассчитать сопротивление резистора динамического торможения с подачей полного потока для двигателя с регулировкой 1 : 2 типа МП-42, 16 кВт, 220 В, 700/1400 об/мин, $I_{я.н} = 84$ А, $r_{я.н} = 0,21$ Ом; с дополнительными данными по примеру 2-6. Требуется быстрое замедление привода.

Решение. По примеру 2-6 имеем $M_{с*} = -0,55$, $T_m = 0,575$ с, $T_{э.н.внхр} = 1,13$ с.

Определяем отношение

$$\frac{T_{э.н.внхр}}{T_m} = \frac{1,13}{0,575} \approx 2.$$

На рис. 2-30 ищем кривую $\frac{T_{э.н}/T_m}{M_c} = \frac{2}{-0,55}$ при начальной частоте вращения торможения $n_* = 2$.

Из двух приведенных кривых $\frac{2}{-0,5}$ выбираем соответствующую 2-кратному пику тока, т. е. допускаемому при 2-кратной частоте вращения. При снижении частоты вращения двигателя кривая ($\frac{2}{-0,5}$, $I_{я.нач} = 2$) имеет токн меньше допустимых, т. е. эта кривая является удовлетворительной.

Полное сопротивление контура динамического торможения будет:

$$R_T = \frac{U_n}{I_{я.нач}} = \frac{220}{2 \cdot 84} = 1,31 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора динамического торможения

$$r_T = R_T - r_{я.н} = 1,31 - 0,21 = 1,1 \text{ Ом.}$$

2-10. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ РЕЗИСТОРАМИ В ЦЕПИ ЯКОРЯ

Рассмотрим способы регулирования частоты вращения двигателя параллельного возбуждения последовательными резисторами в цепи якоря и резисторами, шунтирующими якорь.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Для иллюстрации возможностей регулирования частоты вращения двигателя параллельного возбуждения последовательными резисторами в силовой цепи на рис. 2-31 дано семейство его характеристик и показаны малый и большой статические моменты $M_{с1}$ и $M_{с2}$, не меняющиеся от частоты вращения.

Из рассмотрения этих характеристик вытекает:

1. Для данных частот вращения при малых статических моментах характеристики круче, а следовательно, частоты вращения менее устойчивы (a_1, b_1), чем при больших (a_2, b_2).

2. При низких частотах вращения, например, в точке a_1 при малом статическом моменте и в точке a_2 при большом

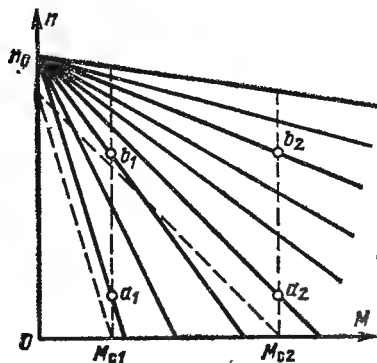


Рис. 2-31. Семейство характеристик двигателя параллельного возбуждения при последовательных резисторах в силовой цепи.

характеристики настолько круты и неустойчивы, что может произойти внезапная остановка двигателя, если немного упадет напряжение или увеличится статический момент. Характеристики при пониженном напряжении сети, которое может вызвать остановку двигателя, показаны пунктиром.

Следовательно, регулирование частоты вращения двигателей параллельного возбуждения последовательными резисторами в силовой цепи дает мало-

устойчивые частоты вращения, особенно при низких частотах вращения. Кроме того, этот способ регулирования частоты вращения неэкономичен. Его применяют только для приводов кратковременного или повторно-кратковременного режима, используя ступени сопротивления пускового резистора.

2. ШУНТИРОВАНИЕ ЯКОРЯ

Механические характеристики двигателя. Ввиду того что при схемах шунтирования (рис. 2-32) понижается подводимое к якорю напряжение, двигатель будет развивать соответственно пониженные частоты вращения.

Рассмотрим, какой вид имеет механическая характеристика двигателя при этой схеме включения резистора. Составим три равенства для цепей, пользуясь указанными на рис. 2-32 направлениями токов и напряжений (здесь $r_d = r_{я.п}$):

$$\left. \begin{aligned} E + I_{я} r_{я.п} - I_{ш} r_{ш} &= 0; \\ U_{н} - I_{ш} r_{ш} - I_{п} r_{п} &= 0; \\ I_{ш} + I_{я} - I_{п} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2-51)$$

На основании этих равенств выведем уравнение, в которое входили бы как переменные только E и $I_{я}$, однозначно связанные с n и M .

После преобразований (2-51) получим:

$$E = U_{н} \frac{r_{ш}}{r_{п} + r_{ш}} - \left(r_{я.п} + \frac{r_{п} r_{ш}}{r_{п} + r_{ш}} \right) I_{я}. \quad (2-52)$$

Выразим э. д. с. якоря через частоту вращения и ток якоря через момент. При номинальном потоке имеем:

$$\frac{E}{U_{н}} = \frac{n}{n_0}, \text{ откуда } E = \frac{U_{н}}{n_0} n,$$

и

$$\frac{I_{я}}{I_{н}} = \frac{M}{M_{н}}, \text{ откуда } I_{я} = \frac{I_{н}}{M_{н}} M.$$

Подставляя эти значения в (2-52) и выражая n в явном виде, получаем:

$$n = n_0 \frac{r_{ш}}{r_{п} + r_{ш}} - \frac{n_0 I_{н}}{M_{н} U_{н}} \left(r_{я.п} + \frac{r_{п} r_{ш}}{r_{п} + r_{ш}} \right) M. \quad (2-53)$$

Из выведенного равенства следует, что механические характеристики двигателя параллельного возбуждения с шунтированным якорем прямолинейны.

Частоту вращения двигателя с шунтированным якорем при $M = 0$ будем обозначать $n_{0ш}$, тогда

$$n_{0ш} = n_0 \frac{r_{ш}}{r_{п} + r_{ш}}. \quad (2-54)$$

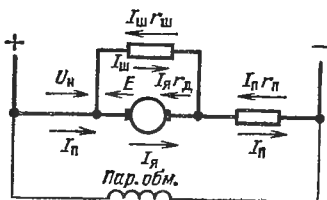


Рис. 2-32. Схема шунтирования якоря двигателя параллельного возбуждения.

Из этого равенства видно, что $n_{0ш}$ меньше, чем n_0 , т. е. происходит снижение частоты вращения даже при холостом ходе двигателя.

Рассмотрим, какой вид имеет семейство механических характеристик двигателя параллельного возбуждения при любом постоянном сопротивлении последовательного резистора $r_{п}$ и разных сопротивлениях шунтирующего резистора $r_{ш}$. Для этого построим вначале крайние характеристики (рис. 2-33):

$$r_{ш} = \infty \text{ и } r_{ш} = 0 \text{ при } r_{п} = \text{const.}$$

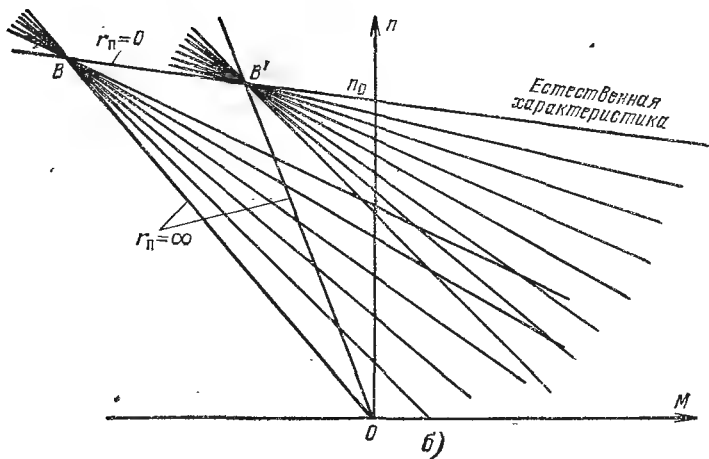
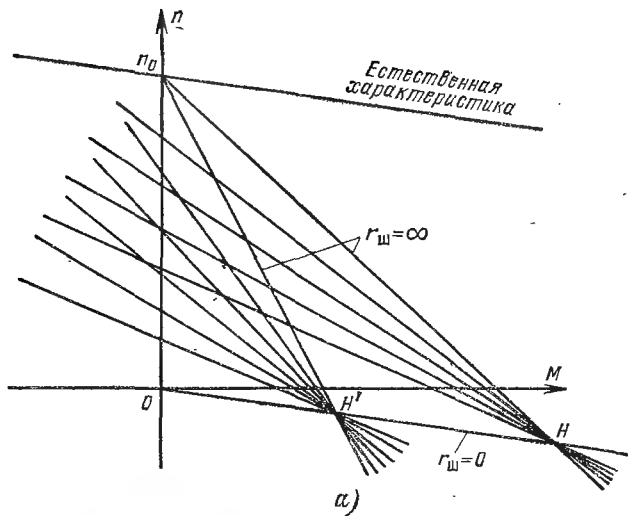


Рис. 2-33. Семейства механических характеристик двигателя параллельного возбуждения с шунтированным якорем.

а — два значения $r_{ш}$ и различные $r_{п}$; б — два значения $r_{п}$ и различные $r_{ш}$.

Характеристика $r_{ш} = \infty$ соответствует наличию только одного сопротивления последовательного резистора и строится просто, как приведено в § 2-3. Предположим, что для данного сопротивления резистора $r_{ш}$ мы построили на рис. 2-33, а характеристику $n_0 - H$.

Характеристика $r_{ш} = 0$ соответствует такому режиму работы двигателя, когда его э. д. с. направлена встречно падению напряжения в якоре $U_{я} = I_{я} r_{я.п}$ и равна ему по величине, как показано на рис. 2-35, Н. В этом случае напряжение между щетками якоря равно нулю и каково бы ни было сопротивление шунтирующего резистора, ток не пойдет через него, а пойдет через якорь. Легко показать, что такой характеристикой будет OH , параллельная естественной характеристике. Это вытекает также из сопоставления данной характеристики

$$E = -I_{я} r_{я.п}$$

с естественной характеристикой

$$E = U_{н} - I_{я} r_{я.п},$$

если считать э. д. с. E пропорциональной частоте вращения n , а ток якоря $I_{я}$ пропорциональным моменту M .

Для других любых реальных значений $r_{ш}$ механические характеристики будут пересекаться в общей точке H и проходить между лучами $r_{ш} = \infty$ и $r_{ш} = 0$.

Приняв большее сопротивление последовательного резистора, мы получим новое семейство характеристик с общей точкой H' , лежащей на той же прямой, параллельной естественной характеристике.

Теперь рассмотрим, какой вид имеет семейство механических характеристик двигателя параллельного возбуждения при некотором постоянном сопротивлении шунтирующего резистора и разных сопротивлениях последовательного резистора. Очевидно, что общей точкой для всех этих характеристик будет такая, при которой сопротивление последовательного резистора не будет влиять на ток якоря. Это может быть только в том случае, если через последовательный резистор не будет проходить ток, что возможно при вращения якоря с частотой вращения выше частоты вращения идеального холостого хода, при которой э. д. с. якоря за вычетом падения напряжения в нем уравнивает приложенное напряжение (рис. 2-35, В), т. е.

$$E - I_{я} r_{я.п} = U_{н}.$$

Сравнивая эту характеристику с естественной

$$E + I_{я} r_{я.п} = U_n,$$

мы видим, что она является продолжением последней.

На рис. 2-33, б показаны два семейства механических характеристик с общими точками пересечений B и B' , соответствующих двум постоянным сопротивлениям шунтирующего резистора при различных последовательных. Точка B получена при меньшем, в точка B' — при большем сопротивлении шунтирующего резистора.

В каждом семействе более крутые характеристики соответствуют большим сопротивлениям последовательного резистора.

Если $r_n = \infty$, это эквивалентно отключению двигателя от сети и мы получим характеристику динамического торможения BO или $B'O$. Если $r_n = 0$, это соответствует включению шунтирующего резистора непосредственно в сеть, т. е. мы получим естественную характеристику.

На основании рис. 2-33 можно сказать, что шунтирование якоря двигателя параллельного возбуждения может дать более пологие механические характеристики, чем включение последовательного резистора, и достаточно устойчивые даже при низких частотах вращения. Однако этот способ еще менее экономичен, чем способ с последовательными резисторами, и потому он применяется только там, где требуется кратковременная низкая частота вращения, например снижение частоты вращения привода перед остановкой и т. п.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОВ В ЯКОРЕ И В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ШУНТИРУЮЩЕМ РЕЗИСТОРАХ

Характеристики токов в резисторах нужны для расчета резисторов по условиям нагрева и для определения забираемого тока и энергии из сети.

Поскольку в двигателях параллельного возбуждения с постоянным потоком моменты пропорциональны токам якоря, механическая характеристика шунтированного двигателя является одновременно электромеханической характеристикой $n = f(M)$.

Представим себе естественную характеристику двигателя и характеристику с шунтированным якорем BH , как показано на рис. 2-34.

Проведя из начала координат прямую, параллельную естественной характеристике, до пересечения с характери-

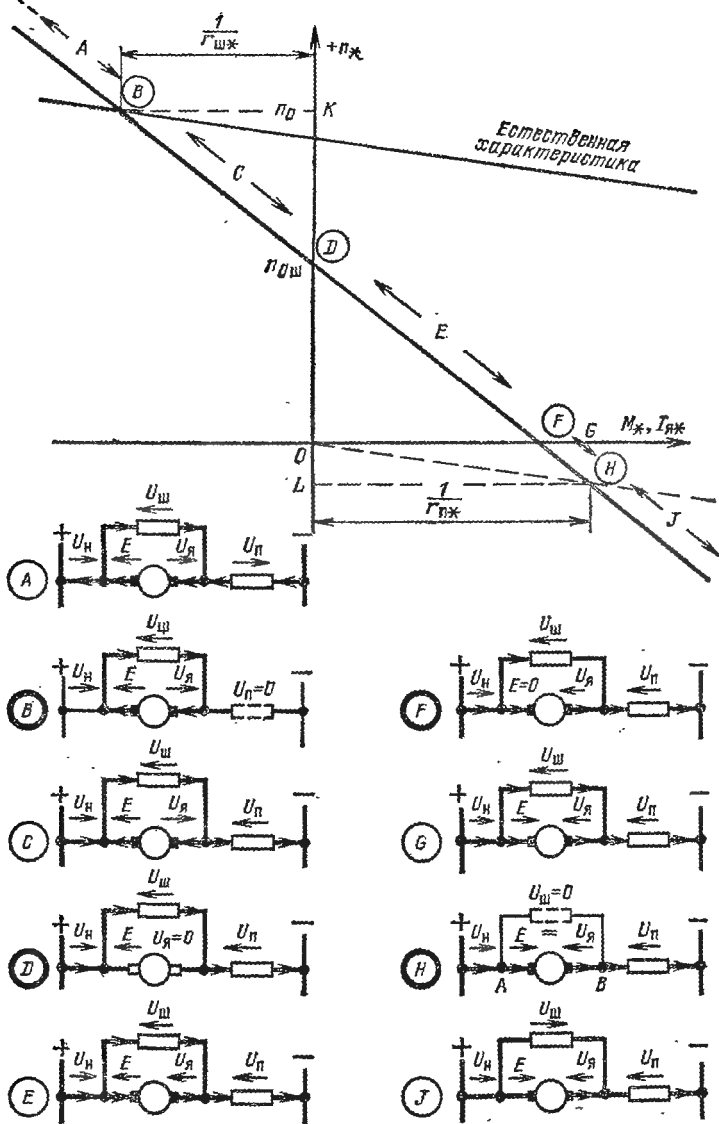


Рис. 2-35. Режимы двигателя параллельного возбуждения с шунтированным якорем.

На рис. 2-35 показаны направления токов и напряжений в участках схемы шунтированного двигателя для различных точек его характеристики. Принятые обозначения $U_{я}$, $U_{п}$ и $U_{ш}$ представляют падения напряжений в якоре, последовательном и шунтирующем резисторах.

Как следует из приведенных схем, двигатель параллельного возбуждения с шунтированным якорем может иметь в различных точках или участках своей характеристики следующие режимы:

- A* — рекуперация энергии в сеть с одновременной отдачей энергии в сопротивлениях резисторов ($r_{ш}$ и $r_{п}$);
- B* — чистое динамическое торможение;
- C* — динамическое торможение на замкнутый контур с потреблением энергии из сети;
- D* — идеальный холостой ход при пониженном напряжении;
- E* — двигательный режим;
- F* — моментный тормоз;
- G* — противовключение с питанием резистора, образующего замкнутый контур, от сети;
- H* — чистое противовключение;
- J* — противовключение с питанием резистора, образующего замкнутый контур, от двигателя.

Двигательный режим *E* имеет наиболее широкое распространение и служит для получения устойчивых низких частот вращения.

Динамическое торможение *C* с подключенным замкнутым контуром к сети имеет место в практике лишь как переходный режим при переводе двигателя с большой частоты вращения на низкую, устойчивую.

Противовключение *G* и *J* применяется для ограничения частоты вращения при перетягивающей нагрузке и для торможения при реверсах. Рекуперация *A* и чистое динамическое торможение *B* шунтированного двигателя в практике бывают редко.

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ В СХЕМАХ ШУНТИРОВАНИЯ ЯКОРЯ

В координатах M_* , n_* строим естественную характеристику и желаемую с шунтированным якорем (рис. 2-35). Эти характеристики являются одновременно и характеристиками тока якоря.

Проведя из начала координат прямую, параллельную естественной характеристике, до пересечения с желаемой характеристикой, получим точку H . В этой точке ток якоря определяется сопротивлением последовательного резистора, поэтому

$$r_n = \frac{U_n}{I_{я(H)}} \quad \text{или} \quad r_{n*} = \frac{1}{I_{я(H)*}}. \quad (2-55)$$

Продолжая естественную характеристику до пересечения с желаемой, получаем точку (B), в которой ток якоря определяется сопротивлением шунтирующего резистора, поэтому

$$r_{ш} = \frac{U_n}{I_{я(B)}} \quad \text{или} \quad r_{ш*} = \frac{1}{I_{я(B)*}}. \quad (2-56)$$

Если характеристика принята очень пологой и точка B получится далеко за пределами чертежа, то шунтирующее сопротивление можно легко определить по частоте вращения $n_{0ш}$, пользуясь выражением (2-54), из которого следует, что

$$r_{ш} = r_n \frac{n_{0ш}}{n_0 - n_{0ш}}. \quad (2-57)$$

Пример 2-9. Рассчитать сопротивления пускового и шунтирующего якоря резисторов для двигателя параллельного возбуждения, приводящего тележку, которая служит для перемещения вагонетки с гончарными трубами из сушильного помещения к печи для обжига (рис. 2-36). Для возможности вкатывания на тележку и выкатывания с нее вагонетки она должна точно останавливаться против рельсов у сушильного помещения и у печи для обжига. Двигатель установлен на самой тележке и пускается дистанционно из цеха при помощи кнопок. Остановки тележки получаются автоматически от воздействия ее на путевые выключатели с двумя фиксированными положениями. В каждом из направлений первый путевой выключатель ($3B$ или $3H$) переводит двигатель в режим шунтирования якоря и замедляет его до получения ползучей скорости тележки; второй выключатель (OB или OH) отключает двигатель от сети и тележка почти мгновенно останавливается от действия динамического торможения и статического момента.

Статический момент на валу двигателя при нагруженной тележке составляет: $M_c = 288 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Данные двигателя: 24 кВт, 220 В, 130 А, 560 об/мин, $r_{д*} = 0,1$. Двигатель управляется по схеме рис. 2-36.

Решение 1. Сопротивление пускового резистора. Определим относительный статический момент, для чего предварительно найдем номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{n_n} 9550 = \frac{24}{560} 9550 = 410 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{с*} = \frac{M_c}{M_n} = \frac{288}{410} = 0,7.$$

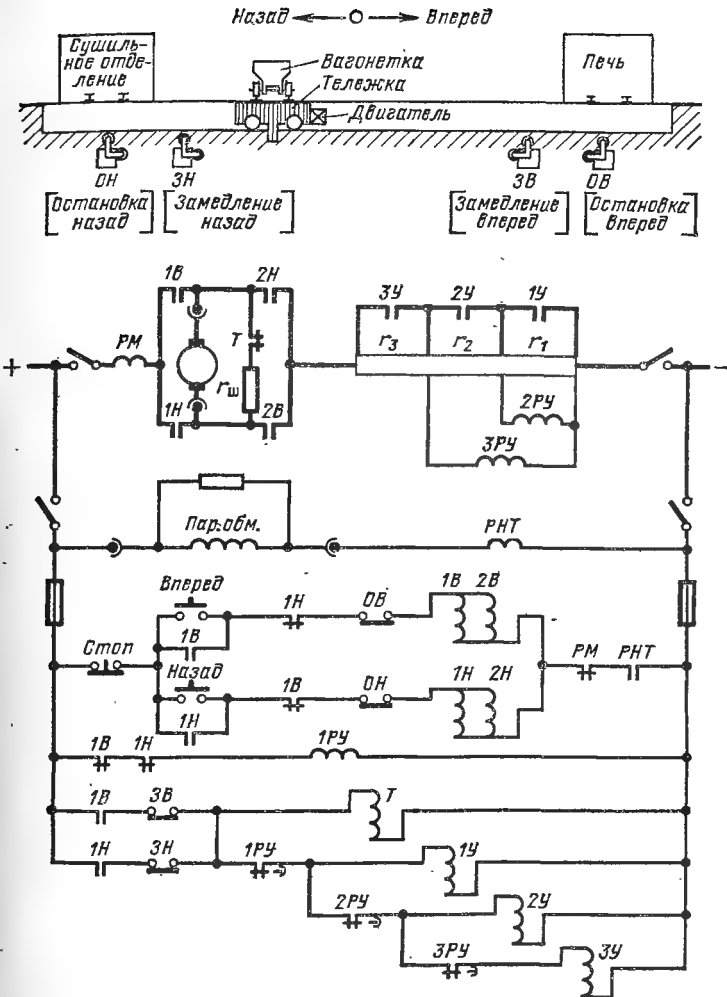


Рис. 2-36. Схема управления двигателем параллельного возбуждения с применением шунтирования якоря для предварительного, перед остановкой, замедления до ползучей скорости тележки.

Для данного привода нежелательно иметь большие пики момента. Зададимся моментом переключения $M_{2*} = 0,9$.

Отношение пиков моментов к моментам переключения по (2-19)

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{r_{д*} M_{2*}}} = \sqrt[3+1]{\frac{1}{0,1 \cdot 0,9}} = 1,825.$$

Пики момента получатся:

$$M_{1*} = M_{2*} \lambda = 0,9 \cdot 1,825 = 1,64,$$

т. е. пики момента невелики и значительно меньше допускаемых по условиям коммутации.

Сопротивления ступеней резисторов по (2-16)

$$r_{3*} = r_{д*} (\lambda - 1) = 0,1 (1,825 - 1) = 0,0825;$$

$$r_{2*} = r_{3*} \lambda = 0,0825 \cdot 1,825 = 0,1505;$$

$$r_{1*} = r_{2*} \lambda = 0,1505 \cdot 1,825 = 0,2750.$$

Полное сопротивление пускового резистора $r_{у*} = 0,5080$.

Для иллюстрации режима работы двигателя на рис. 2-37 построены пусковые характеристики по данным $r_{д*} = 0,1$, $M_{2*} = 0,9$ и $M_{1*} = 1,64$.

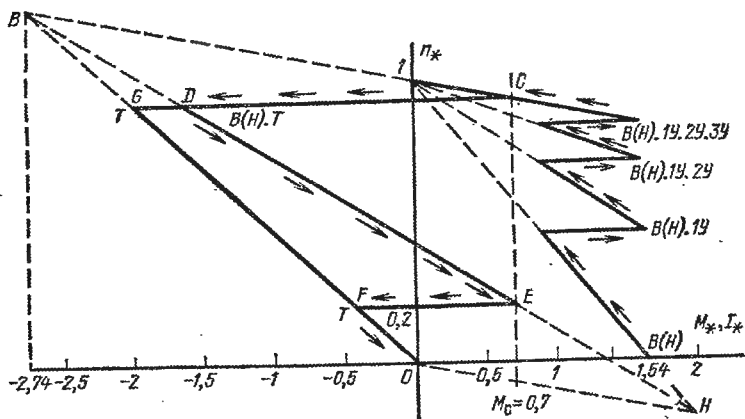


Рис. 2-37. Механические характеристики двигателя, управляемого по схеме рис. 2-36.

2. Сопротивление, шунтирующее якорь резистора. Продолжая характеристику двигателя с полным сопротивлением пускового резистора до пересечения с прямой, параллельной естественной характеристике и проходящей через начало координат, получаем точку H , через которую должна пройти характеристика двигателя с шунтированным якорем.

Примем частоту вращения, соответствующую ползучей скорости тележки перед остановкой, $n_* = 0,2$. Откладывая ее на ординате статического момента, получаем вторую точку E . Соединяя прямой точки

$H - E$ и продолжая ее дальше до точки B , получаем характеристику двигателя с шунтированным якорем. Характеристика динамического торможения строится по точкам $B - O$.

В точке B пересечения характеристики шунтированного двигателя с естественной ток якоря равен $I_{я(в)*} = 2,74$. Подставляя это значение тока в (2-56), получаем:

$$r_{ш*} = \frac{1}{I_{я*}} = \frac{1}{2,74} = 0,365.$$

Определив R_H , можем пересчитать найденные сопротивления пускового и шунтирующего резисторов в абсолютные величины.

Следует отметить, что для случаев, подобных данному, необходимо проверять пикн момента на буксование колес.

2-11. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОТОКОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В § 2-6 были рассмотрены режимы ускорения двигателей ослаблением поля в одну, две и три ступени. При таком малом числе ступеней, применяемом обычно при контакторном управлении, сопротивления ступеней резистора определяются, как было показано, динамикой привода.

Рассмотрим расчет сопротивлений многоступенчатых резисторов в цепи возбуждения, выполняемых в виде реостатов или плоских контроллеров и служащих для плавного регулирования частоты вращения в широких пределах. В этом случае нас обычно не интересует динамика, но требуется правильная разбивка сопротивлений резистора по ступеням для получения требуемых установившихся частот вращения двигателя.

Если нет особых требований по регулированию частоты вращения, рационально рассчитывать реостаты таким образом, чтобы получать равные относительные изменения частоты вращения на каждой ступени. Обозначая через k коэффициент нарастания частоты вращения, получаем на нулевом и последующих положениях реостата частоты вращения относительно номинальной:

$$\left. \begin{aligned} n_{нач} &= n_H; \\ n_1 &= n_H k; \\ n_2 &= n_H k^2; \\ n_3 &= n_H k^3; \\ &\dots \dots \dots \\ n_{кон} &= n_H k^m. \end{aligned} \right\} \quad (2-58)$$

Для того чтобы получить некоторую конечную частоту вращения $n_{\text{кон}}$ при заданном числе ступеней m , коэффициент нарастания частоты вращения получится из (2-58):

$$k = \sqrt[m]{\frac{n_{\text{кон}}}{n_{\text{н}}}}. \quad (2-59)$$

Изготовление реостатов с большим числом ступеней с разными сопротивлениями представляет значительные трудности.

Практика показала, что вполне достаточно разбить все сопротивления ступеней реостата на небольшое число групп, которые обеспечивали бы одинаковый коэффициент нарастания частоты вращения, а внутри групп сопротивления сту-

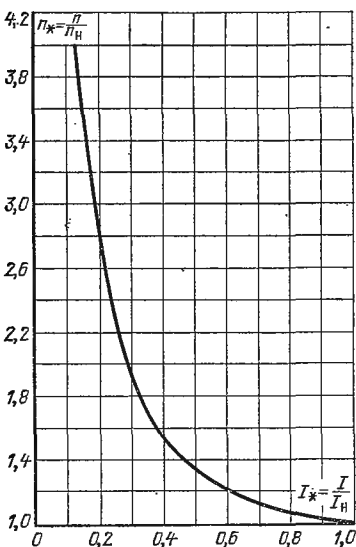


Рис. 2-38. Регулировочная характеристика для двигателей параллельного возбуждения типов МП и ПН.

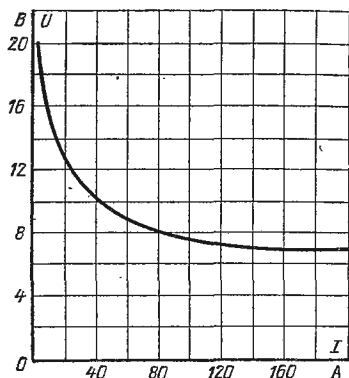


Рис. 2-39. Зависимость допустимого падения напряжения в сопротивлении ступени от тока.

пений разбить равномерно. В этом случае в (2-59) число m нужно рассматривать как число групп ступеней. После определения коэффициента нарастания частоты вращения дальнейший расчет удобно вести при помощи табл. 2-5, представленной в качестве примера для конкретного двигателя, регулируемого в пределах 400—1200 об/мин реостатом на 100 ступеней. Для этого случая, разбивая реостат на 10 групп по 10 ступеней в каждой, получаем

коэффициент нарастания частоты вращения:

$$k = \sqrt[m]{\frac{n_{\text{кон}}}{n_{\text{н}}}} = \sqrt[10]{\frac{1200}{400}} = 1,1176.$$

В табл. 2-5 в четвертом столбце относительные значения тока возбуждения взяты из регулировочной характеристики рис. 2-38, построенной на основании кривой намагничивания рис. 2-14, с учетом, что при любом данном токе возбуждения I_* частота вращения $n_* = 1/\Phi_*$.

Таблица 2-5

Расчет реостата возбуждения для двигателя параллельного возбуждения типа ПН-1750, 33 кВт, 220 В, 400—1200 об/мин, $I_{\text{н}} = 5 \text{ А}$, $r_{\text{пар.гор}} = 44 \text{ Ом}$

№ ступени	Коэффициент нарастания k (2-59)	$n_* = 1/k^m$ (2-58)	I_* (рис. 2-38)	n , об/мин $= 400n_*$	I , А $= 5I_*$	Полное сопротивление цепи возбуждения $R = \frac{U}{I}$, Ом	Сопротивление, Ом			Мощность ступени P , Вт
							реостата $r_{\text{реост}}$	группы ступеней $r_{\text{гр}}$	ступени $r_{\text{ст}}$	
0	1,1176	1	1	400	5	44	—	—	—	—
0—10	1,1176	1,1176	0,745	446	3,72	59	15	15	1,5	37
11—20	1,1176	1,248	0,585	498	2,92	75	31	16	1,6	22
21—30	1,1176	1,392	0,475	556	2,38	92	48	17	1,7	14,5
31—40	1,1176	1,555	0,4	622	2,00	110	66	18	1,8	10
41—50	1,1176	1,735	0,345	694	1,725	128	84	18	1,8	7,2
51—60	1,1176	1,935	0,3	773	1,50	146	102	18	1,8	5,3
61—70	1,1176	2,16	0,265	864	1,325	165	121	19	1,9	4,3
71—80	1,1176	2,41	0,235	962	1,175	187	143	22	2,2	3,9
81—90	1,1176	2,69	0,21	1075	1,05	210	165	23	2,3	3,2
91—100	1,1176	3	0,185	1200	0,925	238	194	28	2,8	3,1

В последнем столбце приведены мощности, потребляемые каждой ступенью, для выбора резисторов по нагреву. Эти мощности указаны одинаковые для всех сопротивлений ступеней реостата своей группы. Мощности определены по закону $I^2 r$, причем для каждой группы принят ток предшествующей группы, чтобы избежать перегрева первых ступеней в каждой группе. При выборе числа ступеней надо еще проверять ступени реостата на разрывную мощность. По данным отечественных заводов безыскровая коммутация на плоских контроллерах обеспечивается при соблюдении зависимости падения напряжения в сопротивлении ступени от величины тока в соответствии с кривой рис. 2-39.

Действительные падения напряжения не должны быть выше указанных на этой кривой.

Если разомкнуть цепь обмотки возбуждения двигателя, то появится в ней э. д. с. самсиндукции, которая будет стремиться поддержать существовавший до этого ток возбуждения. В результате может возникнуть высокое напряжение на зажимах обмотки и между витками, опасное для изоляции обмоток. Для уменьшения этого напряжения применяются разрядные устройства, показанные в схемах на рис. 2-40. Рассмотрим первый способ (схема рис. 2-40, а), т. е. применение постоянно включенного разрядного резистора. Предположим, принято со-

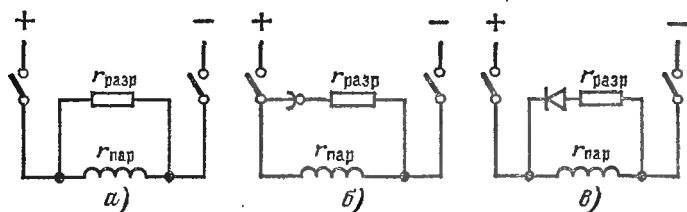


Рис. 2-40. Схемы включений разрядных резисторов.

а — постоянно включенный разрядный резистор; б — разрядный резистор, включаемый разрядным ножом; в — разрядный резистор с вентилем.

противление разрядного резистора, равное сопротивлению параллельной обмотки возбуждения. При мгновенном отключении рубильника в первый момент времени ток возбуждения сохранит свое номинальное значение и, проходя через разрядный резистор, вызовет падение напряжения в нем:

$$I_{\text{н}} r_{\text{разр}} = I_{\text{н}} r_{\text{пар}} = U_{\text{н}},$$

т. е. номинальное напряжение.

Энергия, запасенная в магнитной системе в виде магнитного потока, преобразовываясь в электрическую, будет гаситься в контуре, состоящем из сопротивления параллельной обмотки возбуждения и разрядного резистора, поэтому ток возбуждения и э. д. с. будут падать до нуля.

Если сопротивление разрядного резистора принять равным 2- или 3-кратному сопротивлению обмотки возбуждения, то при мгновенном размыкании цепи возникнет соответственно 2- и 3-кратное напряжение на зажимах обмотки.

Практически напряжение на обмотке получается меньше, чем указанное выше при теоретически мгновенном размыкании цепи, потому что часть энергии магнитного потока расходуется в неизбежной электрической дуге между размыкающими контактами, а часть — в массивных частях магнитной системы от вихревых токов.

По данным опыта при размыкании контактами реле РЭ-100 цепи обмотки возбуждения двигателя ПН-45, 220 В, 4,5 кВт, с 10-кратным сопротивлением разрядного резистора напряжение на обмотке получается 660 В, т. е. 3-кратное, а не 10-кратное.

Сопротивления постоянно включенных разрядных резисторов обычно принимают 3—5-кратными сопротивлению обмотки возбуждения, т. е. $r_{\text{разр}} = (3 \div 5) r_{\text{пар}}$, максимум 10-кратными.

Разрядный резистор может не устанавливаться для двигателей напряжением 110 В, а также для двигателей до 3 кВт при напряжении 220 В.

Схема рис. 2-40, а постоянно включенного разрядного резистора отличается своей надежностью, но она наименее экономична из всех приведенных схем, так как вызывает длительные потери энергии.

Применение в этой схеме варистора вместо обычно резистора снижает затраты электроэнергии в сотни раз. Варистор — это плотная, непористая, керамическая масса темно-серого цвета с механическими характеристиками, аналогичными фарфору. Варистор обладает следующими ценными свойствами: он плохо проводит ток при напряжениях ниже некоторого критического значения и становится хорошим проводником при напряжении выше этого критического значения.

Схема рис. 2-40, б с разрядным резистором, включаемым разрядным ножом рубильника при размыкании цепи, является наиболее экономичной, но она неприемлема в тех многочисленных случаях, когда размыкание цепи может происходить не только от рубильника, но и от других разъединяющих и защитных аппаратов в питающей системе. Очевидно, что по надежности эта схема уступает схеме рис. 2-40, а. В схеме с разрядным ножом принято применять разрядный резистор с сопротивлением, равным сопротивлению обмотки возбуждения, т. е. $r_{\text{разр}} = r_{\text{пар}}$.

Схема рис. 2-40, в основана на вентильном действии полупроводниковых диодов. Нормально через диод проходит ничтожный обратный ток от сети. При размыкании

цепи обмотки возбуждения вентиль оказывается соединенным в замкнутом контуре последовательно с обмоткой возбуждения, свободно пропуская прямой ток. При использовании аппарата с низкой разрывной способностью в разрядной цепи может быть только диод. Эта схема является экономичной и надежной. Недостатком схемы является добавочная стоимость диода, а также необходимость строго следить за полярностью подводимого напряжения.

Рассмотрим расчет на нагрев разрядного резистора, включаемого только на время разряда обмотки возбуждения по схеме рис. 2-40, б и в. Чтобы выбрать сопротивление, нужно для реального спадающего тока при разряде найти эквивалентный по перегреву длительный неизменный ток.

Вначале найдем эквивалентное время $t_{\text{э}}$ такое, которое потребовалось бы для гашения энергии, запасенной в обмотке возбуждения двигателя, если бы ток не падал по экспоненте, а оставался постоянным и равным номинальному:

$$\frac{1}{2} L I_{\text{н}}^2 = I_{\text{н}}^2 (r_{\text{пар}} + r_{\text{разр}}) t_{\text{э}},$$

откуда

$$t_{\text{э}} = \frac{1}{2} \frac{L}{r_{\text{пар}} + r_{\text{разр}}}$$

или окончательно

$$t_{\text{э}} = \frac{1}{2} T_{\text{стат}}. \quad (2-60)$$

В этой простой и очень важной зависимости $T_{\text{стат}}$ представляет собой электромагнитную статическую постоянную времени контура, состоящего из обмотки возбуждения и разрядного регистра, при номинальном токе возбуждения [см. обозначения к (2-24)]:

$$T_{\text{стат}} = \frac{m\omega}{r_{\text{пар}} + r_{\text{разр}}} \frac{\Phi_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} k_s. \quad (2-61)$$

Теперь, зная $I_{\text{н}}$, $t_{\text{э}}$ и частоту отключения обмоток возбуждения, можно, как показано в § 5-2 (рис. 5-6), определить искомый эквивалентный по превышению температуры длительный ток $I_{\text{э.п}}$ в разрядном резисторе (см. пример 5-10).

Для длительно включенных в сеть обмоток возбуждения, т. е. редко отключаемых, будем принимать в расчетах на нагрев три отключения подряд. В этих случаях, например, для двигателей типа ПН, 50—200 кВт при

$r_{\text{разр}} \approx r_{\text{пар}}$ и постоянной времени нагрева разрядного резистора $T \approx 100$ с получим эквивалентный длительный ток по перегреву $I_{\text{э.п}} = (0,05 \div 0,1) I_{\text{н}}$, где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток возбуждения двигателя.

Б. ДВИГАТЕЛИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Двигатели последовательного возбуждения широко применялись для вспомогательных механизмов прокатных станов. Они установлены в больших количествах на старых металлургических заводах и заводах, пущенных до второй мировой войны. В новых прокатных цехах и во вновь проектируемых они почти полностью уступили место более простым, дешевым и требующим меньших капитальных и эксплуатационных затрат на преобразовательные установки асинхронным двигателям с фазным и короткозамкнутым ротором для приводов с легким и средним режимом работы (транспортные рольганги, упоры, сбрасыватели и т. п.) и системе генератор — двигатель, а в последнее время тиристорный преобразователь — двигатель для приводов с тяжелым режимом работы (нажимные механизмы, рабочие рольганги, манипуляторы, ножницы блюмингов и слябингов).

Двигатели последовательного возбуждения очень широко применялись также для кранов на приводах хода моста и тележки, требуя минимального количества троллеев по сравнению с другими типами двигателей, и на приводе подъема, обеспечивая устойчивые малые и большие скорости опускания любых грузов. Но и здесь асинхронные двигатели все больше и больше вытесняют двигатели последовательного возбуждения благодаря простоте и лучшим экономическим показателям, не снижая производительности кранов.

В настоящее время двигатели последовательного возбуждения крепко удерживают позиции в магистральном электротранспорте, в трамвае и в средствах внутриводского транспорта, например рудных и угольных самоходных вагонах, вагоне-весах и т. п. Постоянный ток здесь удобен тем, что при нем достаточно иметь только один троллей, а последовательное возбуждение — по той причине, что двигатели при этом не боятся больших снижений напряжений, обычных при питании троллеем на боль-

шие расстояния, и лучше выдерживают перегрузки на подъемах пути благодаря тому, что при росте тока двигателя его момент возрастает сильнее.

Двигатели последовательного возбуждения более надежны, чем другие двигатели постоянного тока, потому что у них обмотка возбуждения выполняется большого сечения и с ничтожно малым напряжением между витками.

При рассмотрении характеристик двигателей последовательного возбуждения нас будет интересовать не только эта последняя прочная область их применения, но также область применения для механизмов в металлургии и для кранов, так как очень много таких двигателей имеется в действующих цехах заводов и в некотором количестве они вполне оправданно применяются и сейчас.

2-13. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для двигателей последовательного возбуждения не представляется возможным выразить математически естественную механическую характеристику так просто и с той точностью, как для двигателей параллельного возбуждения. Это объясняется тем, что поток полюсов у этих двигателей непостоянен и зависит не только от тока последовательной обмотки, являющегося общим с якорем, но и от магнитной системы, которая, насыщаясь, нарушает пропорциональность между потоком и током.

Имеется ряд эмпирических формул, дающих зависимость потока двигателя последовательного возбуждения от тока. Однако результаты могут быть получены более точные, если пользоваться готовыми естественными характеристиками двигателей. На практике это тем более удобно, что заводы, изготовляющие двигатели, дают эти характеристики в каталогах.

Если для всей серии двигателей данного типа пересчитать характеристики на относительные значения и построить их вместе в одних координатах, то они почти совпадут. Рассчитав по всем этим кривым среднеарифметические значения относительных моментов и частот вращения при данных долегах токах, мы получим так называемые универсальные характеристики для серии двига-

телей данного типа. На рис. 2-41 даны универсальные характеристики краново-металлургических двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д для напряжения 220 В.

Малые моменты соответствуют небольшим токам двигателя и слабому полю, а потому частоты вращения при них получаются высокие; большие моменты соответствуют

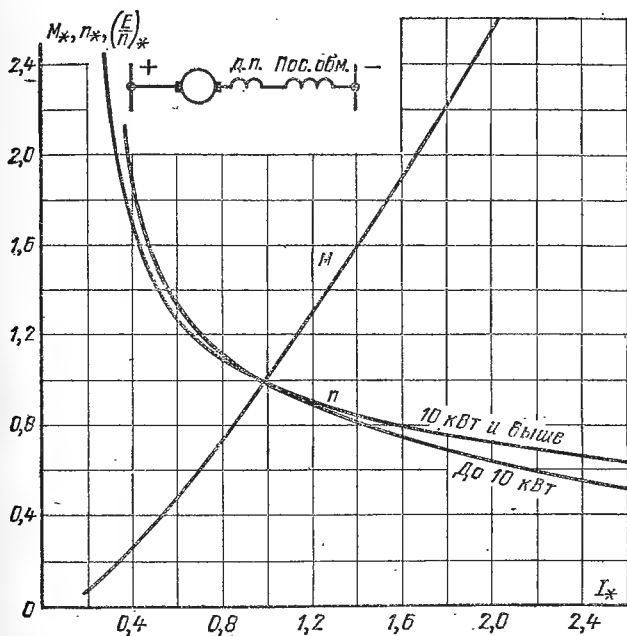


Рис. 2-41. Универсальные характеристики двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д.

большим токам и сильному полю, а поэтому частоты вращения получаются низкие. Благодаря тому что магнитная система двигателей насыщается при токе, меньшем номинального, при более высоких токах поток увеличивается слабо и потому характеристика получается по виду похожей на характеристику двигателя параллельного возбуждения.

Характеристика $M_* = f(I_*)$, приведенная на рис. 2-41, является общей для всей серии двигателей, а характеристик частот вращения — две: одна для двигателей, начи-

ная с 10 кВт и выше, а другая до 10 кВт, имеющих более высокие относительные внутренние сопротивления и как следствие более крутые электрохимические характеристики.

2. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

В практических расчетах характеристик двигателей удобно выражать магнитный поток не в веберах, а пропорциональной величиной — э. д. с. якоря, генерируемой при вращении его с частотой вращения 1 оборот в минуту, $B/(\text{об/мин})$.

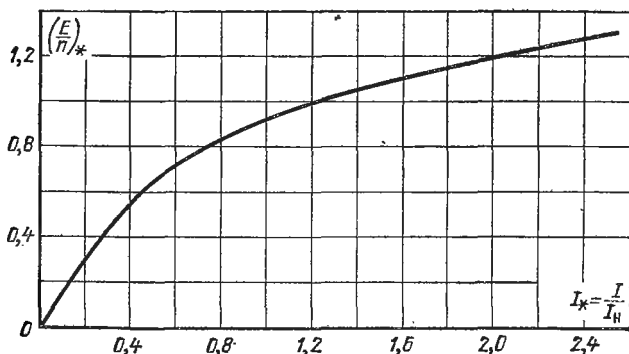


Рис. 2-42. Универсальная кривая намагничивания для двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д.

Действительно, из выражения для э. д. с. якоря

$$E = C_E \Phi n$$

получим:

$$\left(\frac{E}{n}\right) = C_E \Phi.$$

За единицу потока (E/n) примем величину U_n/n_n , т. е. такой поток, который при номинальной частоте вращения вызывает в якоре э. д. с., равную номинальному напряжению двигателя.

Отсюда следует, что единица величины E/n соответствует потоку, большему, чем номинальный, так как номинальный поток вызывает при номинальной частоте вращения э. д. с., меньшую, чем напряжение сети, на падение напряжения внутри двигателя (рис. 2-42).

Выразим относительное значение E/n через относительные э. д. с. и частоты вращения

$$\left(\frac{E}{n}\right)_* = \frac{\left(\frac{E}{n}\right)}{\left(\frac{U_H}{n_H}\right)} = \frac{E}{U_H} = \frac{E_*}{n_*},$$

т. е. относительный поток (E/n) равен относительной э. д. с., деленной на относительную частоту вращения.

Рассчитаем и построим зависимость $(E/n)_* = f(I_*)$, для чего будем задаваться различными последовательными значениями тока возбуждения и для них находить:

$$E_* = U_{H*} - I_* r_{д*} = 1 - I_* r_{д*},$$

а также частоты вращения n_* из универсальной характеристики рис. 2-41. Делением найденных E_* на n_* получим искомые $(E/n)_*$ для принятых токов возбуждения.

Расчет удобно вести при помощи вспомогательной таблицы, как показано в первых шести столбцах табл. 2-6.

Таблица 2-6

Расчет искусственных характеристик при сопротивлениях последовательных резисторов $r_{в*} = 0,4$ и $0,8$
(расчеты даны в относительных значениях, считая $U_H = 1$)

Естественные характеристики (рис. 2-41)			Вспомогательные данные			Искусственные характеристики					
						$r_{в1}=0,4, R_1=0,07+0,4=0,47$			$r_{в2}=0,8, R_2=0,07+0,8=0,87$		
$r_{д}=r_{я.п}+r_{пос}=0,05+0,02=0,07$			$I r_{д}=I \cdot 0,07$	$E_c=U_H-I r_{д}$	$\left(\frac{E}{n}\right)_e=\frac{E_c}{n}$	$I R_1=I \cdot 0,47$	$E_H=U_H-I R_1$	$n_H=\frac{E_H}{(E/n)_e}$	$I R_2=I \cdot 0,87$	E_H	n_H
I	M	n									
0,3	0,16	2,28	0,021	0,979	0,43	0,141	0,859	2,0	0,261	0,739	1,72
0,4	0,26	1,75	0,028	0,972	0,555	0,188	0,812	1,46	0,348	0,652	1,17
0,6	0,50	1,28	0,042	0,958	0,748	0,282	0,718	0,96	0,522	0,478	0,64
0,8	0,74	1,1	0,056	0,944	0,858	0,376	0,634	0,73	0,695	0,305	0,36
1,0	1	1	0,070	0,93	0,93	0,47	0,53	0,57	0,87	0,13	0,14
1,2	1,3	0,92	0,084	0,916	0,995	0,564	0,436	0,438	1,045	-0,045	-0,0453
1,6	1,94	0,81	0,112	0,888	1,095	0,752	0,248	0,226	1,39	-0,39	-0,356
2,0	2,56	0,72	0,14	0,86	1,195	0,94	0,06	0,05	1,74	-0,74	-0,62

На рис. 2-42 дана кривая $(E/n)_* = f(I_*)$, рассчитанная для серии двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д. Из этой кривой видно, что насыщение двигателей начинается при токе возбуждения $I_* \approx 0,3$ номинального. При $I_* = 1$ имеем $(E/n)_* = 0,93$.

Заметим, что можно было бы принять за единицу потока (E/n) при номинальном токе, но тогда мы должны были бы за единицу э. д. с. брать не номинальное напряжение двигателя, а э. д. с. при номинальном токе, равную $E_n = U_n - I_n r_d$, что усложнило бы расчеты.

Необходимо особо обратить внимание, что кривая $(E/n)_* = f(I_*)$ есть кривая действительно существующего потока с учетом реакции якоря, так как для расчета ее брались n_* для различных I_* из реальной характеристики двигателя. Кривая же намагничивания, как известно, дает изменение потока полюсов в зависимости от тока возбуждения при отключенном якоре.

3. ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При любом режиме двигателя последовательного возбуждения и при любой схеме его включения можно легко найти частоту вращения, если в рассматриваемый момент известны его э. д. с. и поток (E/n) , который однозначно связан с током возбуждения и может быть по нему определен. Покажем, как это сделать. При работе двигателя на любой искусственной характеристике соблюдается равенство

$$E_n = C_E \Phi_n n_n.$$

При работе двигателя на естественной характеристике также имеем:

$$E_e = C_E \Phi_e n_e.$$

При одинаковом токе в обмотке возбуждения для искусственной и естественной характеристик $\Phi_n = \Phi_e$.

Поэтому делением двух последних равенств найдем:

$$n_n = \frac{E_n}{\left(\frac{E}{n}\right)_e} \quad \text{или} \quad n_{n*} = \frac{E_{n*}}{\left(\frac{E}{n}\right)_{e*}}. \quad (2-62)$$

Выведенное равенство имеет большое практическое значение.

Задача расчета искусственных характеристик заключается в том, чтобы по известным естественным характеристикам двигателя $M = f(I)$, $n = f(I)$ и его внутреннему сопротивлению r_d рассчитать точки механической характеристики $n_n = f(M_n)$ для любого заданного сопротивления резистора r_v , включенного последовательно в силовую цепь.

Вначале построим естественную механическую характеристику, для чего, задаваясь произвольными последова-

тельными значениями тока I , будем находить из известных естественных характеристик (рис. 2-41) соответствующие значения моментов M и частот вращения n . Очевидно, для принятых значений токов моменты будут оставаться одни и те же при любых сопротивлениях резисторов в силовой цепи двигателя.

Частоты вращения двигателя при включенном добавочном резисторе будут ниже, чем по естественной характеристике, и определяются из равенства (2-62), где

$$E_n = U_n - I(r_d + r_v).$$

Таким образом, мы получим для принятых токов моменты и частоты вращения, по которым можем построить искусственную характеристику.

В табл. 2-6 дан пример расчета искусственных механических характеристик двигателя последовательного возбуждения для сопротивлений добавочных резисторов $r_{в*} = 0,4$ и $0,8$ при сопротивлении двигателя $r_{д*} = 0,07$.

На рис. 2-43 дано семейство механических характеристик для разных сопротивлений добавочных резисторов $r_{в*}$ от $0,05$ до 2 , включая и рассчитанные по табл. 2-6 для $r_{в*} = 0,4$ и $0,8$.

Из этого семейства легко видеть, что при любом данном постоянном моменте двигателя падение частоты вращения его пропорционально сопротивлению добавочного последовательного резистора. Так, падение частоты вращения при $r_{в*} = 0,8$ в 2 раза больше, чем при $r_{в*} = 0,4$.

Этот важный закон нетрудно доказать, исходя из равновесия напряжений в цепи якоря:

$$E = U_n - IR.$$

Заменяя $E = C_E \Phi n$, напишем равенства для частот вращения естественной и искусственной характеристик:

$$\left. \begin{aligned} n_e &= \frac{U_n}{C_E \Phi} - \frac{I}{C_E \Phi} r_d; \\ n_{и} &= \frac{U_n}{C_E \Phi} - \frac{I}{C_E \Phi} (r_d + r_v). \end{aligned} \right\}$$

Вычитая из первого равенства второе и заменяя для данного постоянного значения тока $\frac{I}{C_E \Phi} = a$, получаем искомую зависимость

$$n_e - n_{и} = ar_v. \quad (2-63)$$

Пользуясь указанным выше законом, можно легко построить искусственную механическую характеристику для любого сопротивления добавочного резистора только по двум характеристикам: естественной и одной любой искусственной.

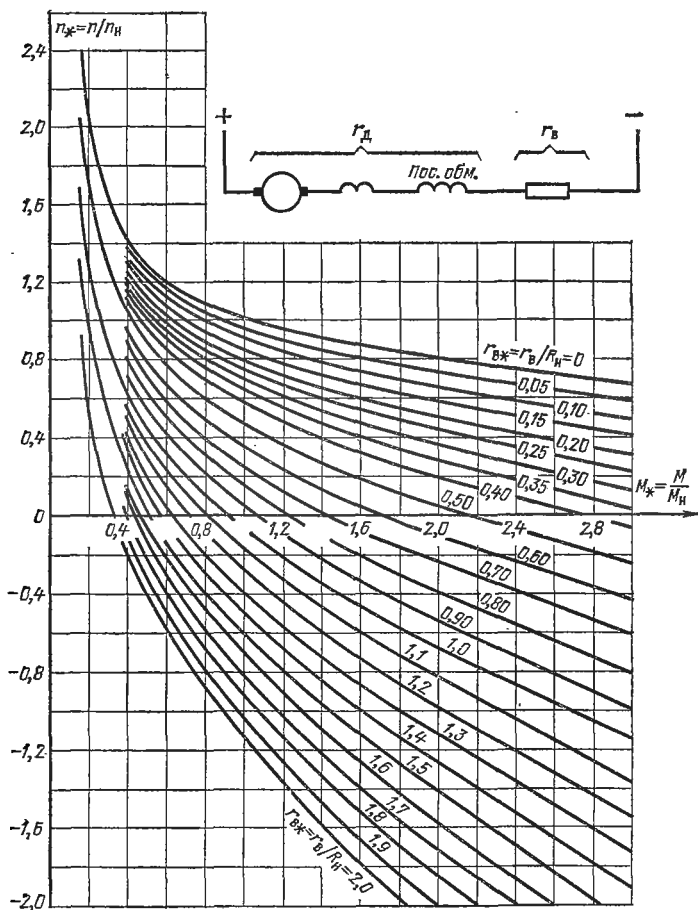


Рис. 2-43. Универсальные механические характеристики двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д.

Заметим, что частоты вращения двигателя в зависимости от тока его при любом сопротивлении последовательного резистора r_n в цепи можно рассчитывать также по

простой формуле

$$n_{\text{н}} = n_{\text{е}} \frac{U_{\text{н}} - I(r_{\text{д}} + r_{\text{п}})}{U_{\text{н}} - Ir_{\text{д}}},$$

которая, как нетрудно видеть, исходит из одинаковых E/n при одинаковых токах двигателя. Действительно, приведенную выше формулу можно переписать:

$$\frac{U_{\text{н}} - I(r_{\text{д}} + r_{\text{п}})}{n_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}} - Ir_{\text{д}}}{n_{\text{е}}} \quad \text{или} \quad \frac{E_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = \frac{E_{\text{е}}}{n_{\text{е}}}.$$

Однако метод расчета искусственных характеристик двигателей с помощью E/n , пропорциональных магнитному потоку, является более физичным и удобным, особенно для схем с комбинированным включением резисторов, как показано в § 2-17.

Говоря о свойствах двигателя последовательного возбуждения, необходимо еще отметить следующие особенности:

1. При моментах, бóльших номинального, кратности момента больше кратности тока. Так, при 2-кратном токе момент получается 2,5-кратный, что объясняется усилением потока при больших токах. Это последнее свойство является преимуществом двигателя последовательного возбуждения для тех случаев, когда требуется от двигателя большая перегрузочная способность.

2. При малых статических моментах двигатель развивает большую частоту вращения, а при больших — автоматически снижает ее. Это свойство двигателя последовательного возбуждения часто является полезным в приводах подъема крановых установок, где легкие грузы и пустой крюк желательно по условиям производительности перемещать на повышенных скоростях.

3. Двигатели последовательного возбуждения в отличие от всех других типов двигателей хорошо переносят любые падения напряжения в сети, так как ток якоря не зависит от подводимого напряжения, а зависит только от статического момента. Это свойство двигателей последовательного возбуждения является ценным для электротранспорта и для крановых устройств.

2-14. ПУСК

Рассмотрим пуск двигателей последовательного возбуждения при помощи резисторов в цепи якоря, как показано на рис. 2-6 для двигателя смешанного возбуждения.

1. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ЛУЧЕВОЙ ДИАГРАММЫ

Представим себе семейство характеристик двигателя последовательного возбуждения при различных сопротивлениях последовательных резисторов в силовой цепи (рис. 2-44). Для двух произвольных значений токов I_1 и I_2 отметим на характеристиках соответствующие частоты вращения буквами.

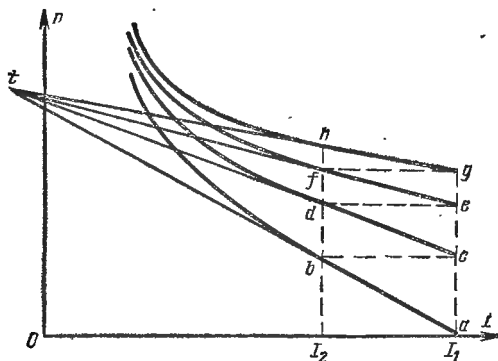


Рис. 2-44. Построение лучевой диаграммы для двигателя последовательного возбуждения.

Проведя прямые ab , cd , ef , gh , мы убедимся, что все они пересекутся в некоторой точке t . Это можно доказать при помощи (2-63), на основании которой можно написать:

при $I_1 = \text{const}$

$$ac = a_1 r_{в1}, \quad ce = a_1 r_{в2}, \quad eg = a_1 r_{в3},$$

при $I_2 = \text{const}$

$$bd = a_2 r_{в1}, \quad df = a_2 r_{в2}, \quad fh = a_2 r_{в3}.$$

Делением находим:

$$\frac{ac}{bd} = \frac{a_1}{a_2}; \quad \frac{ce}{df} = \frac{a_1}{a_2}; \quad \frac{eg}{fh} = \frac{a_1}{a_2}.$$

Очевидно, что такие соотношения возможны лишь при том условии, если прямые ab , cd , ef , gh пересекаются в одной точке.

Основываясь на изложенном выше, сопротивление пускового резистора можно рассчитать следующим образом (рис. 2-44):

а) строим естественную характеристику двигателя;

б) исходя из желательных пиков момента, задаемся пиками тока I_1 и по ним определяем соответствующее полное сопротивление силовой цепи для неподвижного якоря

$$R = U_n / I_1;$$

в) предположительно для получения одинаковых пиковых и переключающих токов при заданном числе ступеней задаемся переключающим током I_2 и для этого тока определяем аналитически частоту вращения двигателя n_n (точка b) при полностью введенном сопротивлении добавочного резистора

$$n_n = n_e \frac{U_n - I_2 R_n}{U_n - I_2 r_d}; \quad (2-64)$$

г) для токов I_1 и I_2 обозначим буквами g, h и a, b точки естественной и искусственной характеристик при введенном полном сопротивлении пускового резистора; через точки $g-h$ и $a-b$ проводим прямые до пересечения в точке t ;

д) проводя лучи из точки t , строим пусковые характеристики cd, ef ;

е) находим полное сопротивление пускового резистора и сопротивления ступеней

$$r_B = R - r_d$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{ac}{ga} r_B; \\ r_2 &= \frac{ce}{ga} r_B; \\ r_3 &= \frac{eg}{ga} r_B. \end{aligned} \right\} \quad (2-65)$$

Если бы при построении пусковых характеристик пики тока оказались неодинаковыми, то нужно было бы задаться иным значением I_2 и вновь построить характеристики.

Для практических расчетов можно не показывать лучей, идущих от точки t , проведенных на рис. 2-44 лишь для наглядности. Можно также не строить естественную характеристику, показывая лишь две точки, соединенные прямой, соответствующие пиковому и переключающему токам.

Приведенный способ расчета сопротивлений пусковых резисторов удобен тем, что все построения ведутся в одном квадранте с минимальным количеством вспомогательных кривых.

Пример 2-10. Рассчитать сопротивления ступеней пускового резистора для двигателя последовательного возбуждения МП-22, 4,5 кВт, 220 В, 880 об/мин, $I_{я.н} = 28$ А при ПВ = 25%, приводящего буксовый кантователь сортового стана. Буксовый кантователь находится на линии роляганга близко от непрерывно вращающихся валков клетки. Когда перемещаемая ролягангом заготовка войдет в квадратное отверстие буксы, последняя должна быстро повернуть ее на 90° с таким расчетом, чтобы кантовка оканчивалась раньше, чем начало непрерывно движущейся заготовки войдет в валки прокатной клетки. Остановка двигателя после поворота буксы осуществляется динамическим торможением. Силовая часть схемы двигателя дана на рис. 2-49.

Решение. В первом квадранте (рис. 2-45) строим естественную характеристику двигателя из рис. 2-41. Поскольку требуется очень

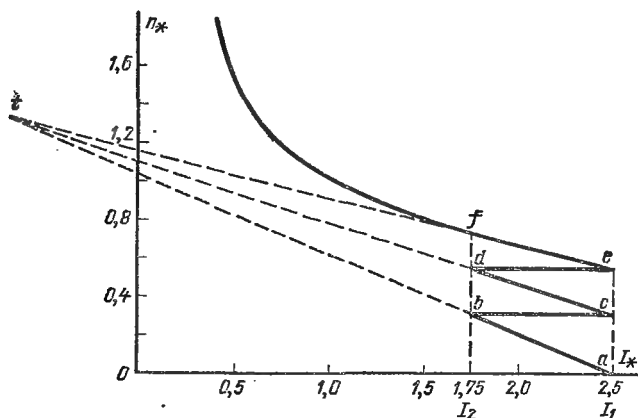


Рис. 2-45. Расчет сопротивления пускового резистора для двигателя буксового кантователя.

быстрое ускорение, задаемся пиками тока, максимально допускаемыми по условиям коммутации, считая, что механизм имеет прочную конструкцию и не боится больших толчков момента. Согласно указаниям § 1-2 можно для двигателя данной мощности допускать 3-кратные пики тока. Учитывая частые пуски кантователя и возможные колебания напряжения в сети, примем с запасом 2,5-кратные пики тока. Вследствие того что данные по рис. 2-41 ограничены моментом 2,4, найдем приблизительно продолжением по прямой для $I_{1*} = 2,5$ момент $M_{1*} = 3,4$.

Полное пусковое сопротивление цепи якоря определится:

$$R_* = \frac{U_{н*}}{I_{1*}} = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

Предположительно задаемся переключающими токами $I_{2*} = 1,75$. Частота вращения двигателя при полностью введенном резисторе и токе, равном переключающему, определится из (2-64), в которой $n_{е*} = 0,73$ — из характеристики рис. 2-45 для $I_{2*} = 1,75$, а $r_{д*} = r_{я.п*} + r_{пос*} = 0,115 + 0,045 = 0,16$ — из кривых рис. 2-3.

Подставляя данные, получаем:

$$n_{и*} = n_{е*} \frac{U_{н*} - I_{2*} R_*}{U_{н*} - I_{2*} r_{д*}} = 0,73 \frac{1 - 1,75 \cdot 0,4}{1 - 1,75 \cdot 0,16} = 0,305.$$

Откладываем эту частоту вращения по вертикали I_{2*} (точка b) и проводим первую характеристику ускорения ab .

Проводим прямые через ab и ef до пересечения в точке t и, построив луч из этой точки так, чтобы пики тока и токи переключения были одинаковы, получим вторую характеристику ускорения cd . Пики тока получились одинаковыми. Это значит, что правильно был выбран I_{2*} .

Находим полное сопротивление добавочного резистора:

$$r_{в*} = R_* - r_{д*} = 0,4 - 0,16 = 0,24.$$

Определяем отрезки в миллиметрах:

$$ac = 15,2;$$

$$ce = 11,8;$$

$$ae = 27,0$$

и по ним находим сопротивления ступеней в относительных значениях

$$r_{1*} = \frac{ac}{ae} r_{в*} = \frac{15,2}{27} 0,24 = 0,135;$$

$$r_{2*} = \frac{ce}{ae} r_{в*} = \frac{11,8}{27} 0,24 = 0,105.$$

Следует заметить, что в данном примере из-за больших динамических моментов ускорение двигателя должно происходить очень быстро (момент инерции привода небольшой) и потому сглаживание кривой тока благодаря влиянию э. д. с. самоиндукции должно получиться значительным.

2. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ СЕМЕЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК

Имея семейство характеристик, можно очень просто и быстро определять сопротивления ступеней, подбирая подходящие из них или проводя их от руки, соблюдая при этом пропорциональность в расположении точек между смежными характеристиками. На рис. 2-46 жирными линиями показаны пусковые характеристики, найденные подбором для двигателя последовательного возбуждения с двумя ступенями ускорения с моментами переключения $M_{2*} = 1$. Сопротивления ступеней получились:

$$r_{1*} = 0,45 - 0,17 = 0,28;$$

$$r_{2*} = 0,17.$$

Расчет сопротивлений пусковых резисторов подбором из семейства характеристик дает хорошую наглядность и

особенно удобен в тех случаях, когда пики момента или переключаящие моменты принимаются неодинаковыми для различных ступеней.

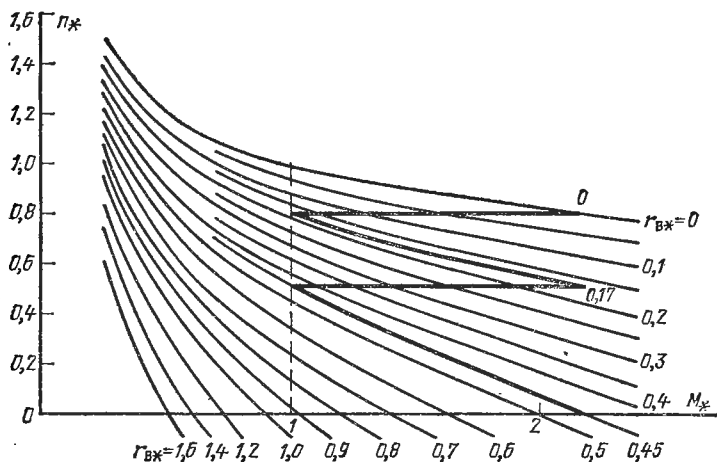


Рис. 2-46. Определение подбором при помощи семейства характеристик сопротивлений ступеней пусковых резисторов для двигателя последовательного возбуждения.

При помощи семейства характеристик также легко можно определить сопротивления предварительных ступеней по принятым предварительным моментам (§ 2-5).

3. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

При пуске двигателей последовательного возбуждения получается значительное сглаживание кривой тока, более сильное, чем у двигателей параллельного возбуждения (рис. 2-7), что объясняется наличием добавочной индуктивности от последовательной обмотки возбуждения. В качестве иллюстрации явления сглаживания на рис. 2-47 дана

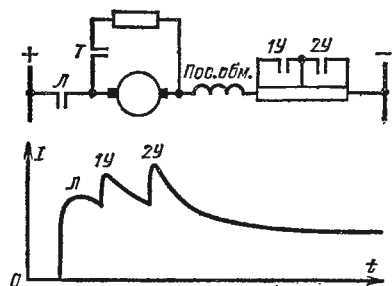


Рис. 2-47. Осциллограмма тока двигателя последовательного возбуждения при пуске.

осциллограмма тока двигателя последовательного возбуждения 40 кВт, 220 В, 550 об/мин, ПВ = 25%, приводящего толкатель методической печи прокатного стана при пуске без нагрузки. Ради упрощения на схеме не показаны реверсивные контакторы.

2-15. ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕ

Режимы противовключения рассмотрены подробно в § 2-7 для двигателей параллельного возбуждения. Приведенная там же схема на рис. 2-22 является обычной для двигателей последовательного возбуждения, если исключить показанную на схеме параллельную обмотку.

1. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТУПЕНИ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

Для двигателей последовательного возбуждения расчет сопротивления ступени противовключения производится по той же формуле, что и для двигателей параллельного возбуждения (2-33):

$$r_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{н}} + E_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} - (r_{\text{д}} + r_{\text{у}}), \quad (2-66)$$

в которой:

- а) $U_{\text{н}}$, $r_{\text{д}}$, $r_{\text{у}}$ считаем известными;
- б) $I_{\text{доп}}$ определяется из условия ограничения тока до допускаемой величины в зависимости от частоты вращения, как указано в § 1-2 (см. рис. 1-5);
- в) $E_{\text{макс}}$, соответствующая принятому $I_{\text{доп}}$ и максимально возможной частоте вращения $n_{\text{макс}}$, определится:

$$E_{\text{макс}} = (E/n)_{\text{доп}} n_{\text{макс}}, \quad (2-67)$$

где поток $(E/n)_{\text{доп}}$ определяют по допускаемому току $I_{\text{доп}}$ из известной характеристики $(E/n) = f(I)$ (рис. 2-42) или из равенства

$$\left(\frac{E}{n}\right)_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{доп}} r_{\text{д}}}{n_{\text{е}}}, \quad (2-68)$$

найдя предварительно из естественной характеристики частоту вращения $n_{\text{е}}$, соответствующую допускаемому току $I_{\text{доп}}$.

Максимально возможная частота вращения $n_{\text{макс}}$ в (2-67) определяется из условий двигательного режима, предшествующего противовключению, по минимальному

статическому моменту. Если нет уверенности в точности данных статического момента, то максимальную частоту вращения нужно принимать с некоторым запасом, т. е. несколько больше, чем для минимального статического момента.

Расчет и построение характеристик двигателей последовательного возбуждения для режима противовключения производится теми же способами, как и для двигательного режима, способами, рассмотренными в § 2-13.

На рис. 2-43 вместе с универсальными характеристиками двигательного режима даны также универсальные характеристики противовключения, при помощи которых можно найти сопротивление ступени противовключения выбором соответствующей характеристики, не производя расчетов.

2. РАСЧЕТ ТОЧКИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ РЕЛЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

Для расчета точки присоединения реле противовключения будем исходить из условия: иметь при максимально возможной частоте вращения в режиме противовключения напряжение на катушке реле равным нулю. Тогда для сопротивления r_x участка цепи между минусом сети и точкой присоединения реле противовключения для двигателей параллельного и последовательного возбуждения можно использовать одну и ту же формулу (2-35)

$$r_x = R \frac{U_n}{U_n + E_{\text{макс}}}, \quad (2-69)$$

где

$$R = r_d + r_y + r_{\text{пр}}.$$

Точку присоединения реле противовключения можно найти подбором при помощи универсальных характеристик, что дает экономию во времени и некоторую наглядность в расчетах.

На рис. 2-48 даны универсальные характеристики напряжения на реле противовключения в функции частоты вращения для различных точек присоединения реле к цепи двигателя последовательного возбуждения. Выбирая желательную характеристику, находим, какому отношению r_x/R она соответствует, и по сопротивлению R определяем r_x . Характеристики рис. 2-48 рассчитаны для сопротивления силовой цепи двигателя, 1,3-кратного номинальному, как для некоторого среднего практического значе-

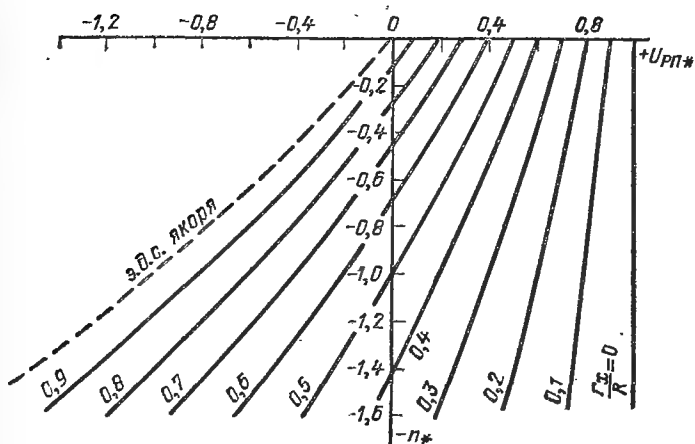
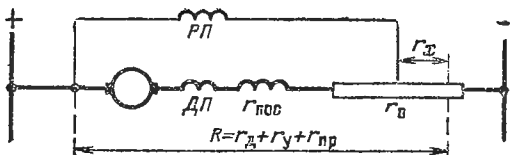


Рис. 2-48. Универсальные характеристики напряжения на реле противовключения в функции частоты вращения для различных точек присоединения его к цепи двигателя последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д.

ния, но они могут быть использованы с достаточной степенью точности в пределах сопротивлений силовой цепи двигателя, 1—1,5-кратного номинальному.

Расчет характеристик $U_{РП} = f(n)$ для $R_* = 1,3$ и различных r_x/R велся следующим образом: задавались различными значениями I_* и по ним определяли напряжения на реле противовключения для определенных точек присоединения его:

$$U_{РП*} = 1 - I_* r_{x*}. \quad (2-70)$$

Частоты вращения якоря находили по формуле

$$n_{и*} = \frac{E_{и*}}{(E/n)_*}, \quad (2-71)$$

определив предварительно

$$E_{и*} = 1 - I_* R_* \quad (2-72)$$

и $(E/n)_*$ по универсальной естественной характеристике рис. 2-42.

Так был получен ряд значений $U_{рп*}$ и $n_{и*}$ для каждого принятого значения $r_{х*}$ и по ним было построено приведенное на рис. 2-48 семейство характеристик. Для общности расчетов характеристики отнесены не к $r_{х*}$, а к r_x/R .

Как указывалось ранее в § 2-7, уставка напряжения втягивания реле противовключения должна быть на 20% ниже напряжения на нем при неподвижном якоре. Для двигателей последовательного возбуждения мы получим ту же формулу (2-38), что и для двигателей параллельного возбуждения, т. е.

$$U_{вт} = 0,8U_n \left(1 - \frac{r_x}{R}\right). \quad (2-73)$$

Пример 2-11. Для двигателя последовательного возбуждения типа МП-72, 80 кВт, 220 В, 460 об/мин, 405 А при ПВ = 25% рассчитать сопротивление ступени противовключения добавочного резистора, точку присоединения реле противовключения и уставку напряжения втягивания его. Требуется быстрое торможение. Минимальный статический момент $M_{с*} = 0,4$ номинального момента двигателя. Из расчетов полное сопротивление пусковых ступеней получилось равным $r_{у*} = 0,45$.

Решение. а) Максимальная частота вращения двигательного режима при минимальном статическом моменте $M_{с*} = 0,4$ по естественной механической характеристике рис. 2-43 будет:

$$n_{\max *} = 1,44.$$

При этой частоте вращения найдем максимальный допустимый ток по диаграмме рис. 1-5:

$$I_{\text{доп} *} = 2,3.$$

Для этого тока находим по кривой рис. 2-42:

$$(E/n)_{\text{доп} *} = 1,26.$$

Максимальная э. д. с. по формуле (2-67)

$$E_{\max *} = (E/n)_{\text{доп} *} n_{\max *} = 1,26 \cdot 1,44 = 1,8.$$

Наконец, по (2-66) найдем искомое сопротивление ступени противовключения:

$$r_{пр*} = \frac{1 + E_{\max *}}{I_{\text{доп} *}} - (r_{д*} + r_{у*}) = \frac{1 + 1,8}{2,3} - (0,05 + 0,45) = 0,7,$$

или

$$r_{пр} = 0,7R_n = 0,7 \frac{220}{405} = 0,7 \cdot 0,543 = 0,38 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ступени противовключения можно было определить значительно проще — выбором характеристики из семейства рис. 2-43 для $I_{\text{доп} *} = 2,3$, $n_{\max *} = 1,44$.

б) Точка присоединения реле противовключения найдется из (2-69), в которой

$$R_* = r_{д*} + r_{у*} + r_{пр*} = 0,05 + 0,45 + 0,7 = 1,2.$$

Поэтому

$$r_{x*} = R_* \frac{1}{1 + E_{\text{макс}*}} = 1,2 \frac{1}{1 + 1,8} = 0,43,$$

или

$$r_x = r_{x*} R_H = 0,43 \cdot 0,543 = 0,234 \text{ Ом.}$$

в) Уставка напряжения втягивания реле противовключения по (2-73):

$$U_{вт*} = 0,8 \left(1 - \frac{r_{x*}}{R_*} \right) = 0,8 \left(1 - \frac{0,43}{1,2} \right) = 0,51,$$

или

$$U_{вт} = U_{вт*} U_H = 0,51 \cdot 220 = 112 \text{ В.}$$

2-16. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

Рассмотрим динамическое торможение при независимом возбуждении, применяемое для быстрой остановки механизмов в нормальных условиях, и динамическое торможение при самовозбуждении, применяемое в аварийных случаях.

1. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕЗАВИСИМОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

На рис. 2-49 показана схема нереверсивного управления двигателем с одной ступенью динамического торможения и даны соответствующие пусковые и тормозная характеристики.

Динамическое торможение получается, если при вращении двигателя разомкнуть контакторы L , $1Y$, $2Y$ и замкнуть T и $ТП$. Контактор $ТП$ дает обходное независимое питание последовательной обмотке возбуждения, а контактор T подключает резистор динамического торможения к якорю двигателя.

Поскольку динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения осуществляется с постоянным потоком, то механические характеристики его получаются такие же, как и для двигателя параллельного возбуждения (§ 2-8).

На рис. 2-49 пунктиром показаны переходы на тормозную характеристику при различных частотах вращения двигателя.

тивление r_y обычно меньше номинального, поэтому сопротивлением r_{Π} вместе с сопротивлением последовательной обмотки $r_{\text{пос}}$ дополняют сопротивление цепи до номинального

$$r_{\Pi} = R_{\text{н}} - (r_y + r_{\text{пос}}). \quad (2-74)$$

Не оправдывается пропускание через последовательную обмотку тока выше номинального, так как уже при номинальном токе магнитная система двигателя насыщена и небольшое увеличение потока требует значительного увеличения тока, что неэкономично.

Сопротивление резистора торможения r_{τ} рассчитывается, исходя из ограничения тока в начальный момент торможения до допускаемой величины.

Очевидно, что формула для сопротивления резистора торможения двигателя последовательного возбуждения та же, что и для двигателя параллельного возбуждения (2-42), т. е.

$$r_{\tau} = \frac{E_{\text{макс}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я. п.}} \quad (2-75)$$

В зависимости от статического момента начальная частота вращения торможения двигателя последовательного возбуждения может сильно меняться, поэтому $E_{\text{макс}}$ определяется следующим образом. Из условий двигательного режима определяется э. д. с. якоря при номинальной частоте вращения и номинальном токе:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{д.}} \quad (2-76)$$

Вследствие того что сопротивление резистора поля рассчитывается так, чтобы иметь при динамическом торможении в последовательной обмотке номинальный ток, $E_{\text{макс}}$ будет во столько раз больше $E_{\text{н}}$, во сколько $n_{\text{макс}}$ больше $n_{\text{н}}$, поэтому

$$E_{\text{макс}} = E_{\text{н}} \frac{n_{\text{макс}}}{n_{\text{н}}}. \quad (2-77)$$

Ток $I_{\text{доп}}$ принимается по данным рис. 1-5 для частоты вращения $n_{\text{макс}}$.

В случае двух ступеней динамического торможения, как показано на рис. 2-27, сопротивления резисторов торможения рассчитываются для первого и второго пиков тока соответственно

$$\left. \begin{aligned} r_{\text{в1}} &= \frac{E_1}{I_{\text{доп1}}} - r_{\text{я. п.}}, \text{ где } E_1 = E_{\text{н}} \frac{n_1}{n_{\text{н}}}; \\ r_{\text{в2}} &= \frac{E_2}{I_{\text{доп2}}} - r_{\text{я. п.}}, \text{ где } E_2 = E_{\text{н}} \frac{n_2}{n_{\text{н}}}. \end{aligned} \right\} \quad (2-78)$$

В зависимости от условий частота вращения n_2 определяется по (2-40) и (2-41) для получения минимального времени или пути замедления. Моменты, входящие в указанные формулы, могут быть легко определены по токам, так как при динамическом торможении с номинальным током возбуждения относительные моменты равны относительным токам якоря.

После того как будут определены по (2-78) сопротивления добавочных резисторов динамического торможения $r_{в1}$ и $r_{в2}$, можно по (2-46) или (2-47) определить сопротивления ступеней.

2. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ САМОВОЗБУЖДЕНИИ

На рис. 2-50 показана схема аварийного динамического торможения двигателя последовательного возбуждения, применяемая для остановки подъемных устройств и для ограничения скорости опускания груза при отказе в работе

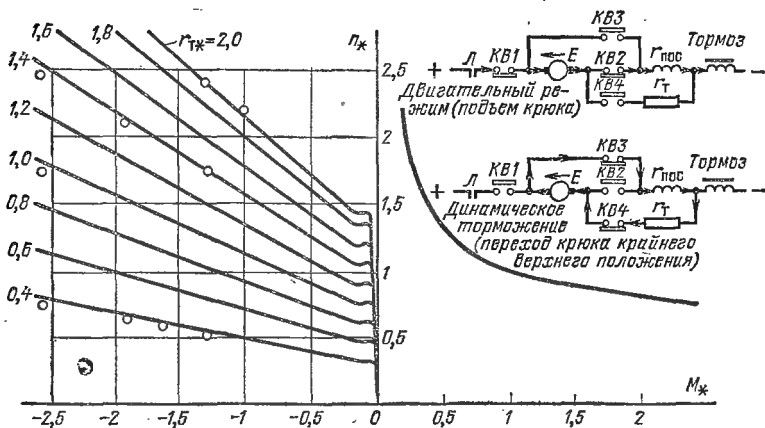


Рис. 2-50. Механические характеристики динамического торможения двигателя последовательного возбуждения при самовозбуждении.

тормоза. На верхней схеме показаны направления э. д. с. якоря и тока в последовательной обмотке возбуждения при работе двигателя в направлении подъема, а на нижней — в режиме динамического торможения при переходе крюком своего верхнего предельного положения.

Благодаря специальной схеме переключения якорь включается последовательно с обмоткой возбуждения через

резистор динамического торможения, при этом ток в обмотке возбуждения, создаваемый э. д. с. якоря, сохраняет свое направление, что является непременным условием для самовозбуждения.

Контакты KB являются контактами конечного выключателя главного тока, который приводится в действие крюком при переходе им предельного положения в направлении подъема.

Динамическое торможение двигателей при самовозбуждении менее эффективно, чем при независимом возбуждении с питанием от сети. Это объясняется уменьшением потока при снижении частоты вращения двигателя. Учитывая, что аварийное торможение бывает редко, можно допустить повышенные токи и получить повышенные моменты, чем можно до некоторой степени скомпенсировать потерю эффекта от спадания потока.

Характеристики динамического торможения двигателя последовательного возбуждения при самовозбуждении приведены на рис. 2-50. Они построены по универсальным характеристикам серии краново-металлургических двигателей.

Расчет этих характеристик произведен следующим образом:

1. Для разных произвольных токов двигателя I определены потребные э. д. с. якоря по принятому сопротивлению резистора торможения r_t , т. е.

$$E_{\text{я}} = I (r_{\text{я.п}} + r_t),$$

и потоки $(E/n)_e$ по кривой рис. 2-42.

2. Соответствующие частоты вращения $n_{\text{я}}$ найдены по формуле

$$n_{\text{я}} = \frac{E_{\text{я}}}{(E/n)_e}.$$

3. Для принятых значений токов определены моменты по характеристикам рис. 2-41.

2-17. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Простейший способ регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения состоит в изменении сопротивления последовательно включенного резистора в силовой цепи, как показано на рис. 2-43. Этот способ применяется для приводов хода моста и тележки на

кранах и для приводов с тяговыми двигателями. Характеристики, получаемые при этом, не обеспечивают устойчивых частот вращения, так как они в сильной степени зависят от статического момента.

На рис. 2-51—2-54 приведены различные способы комбинированного включения резисторов, позволяющие получить устойчивые частоты вращения двигателя в двигательном и генераторном режимах.

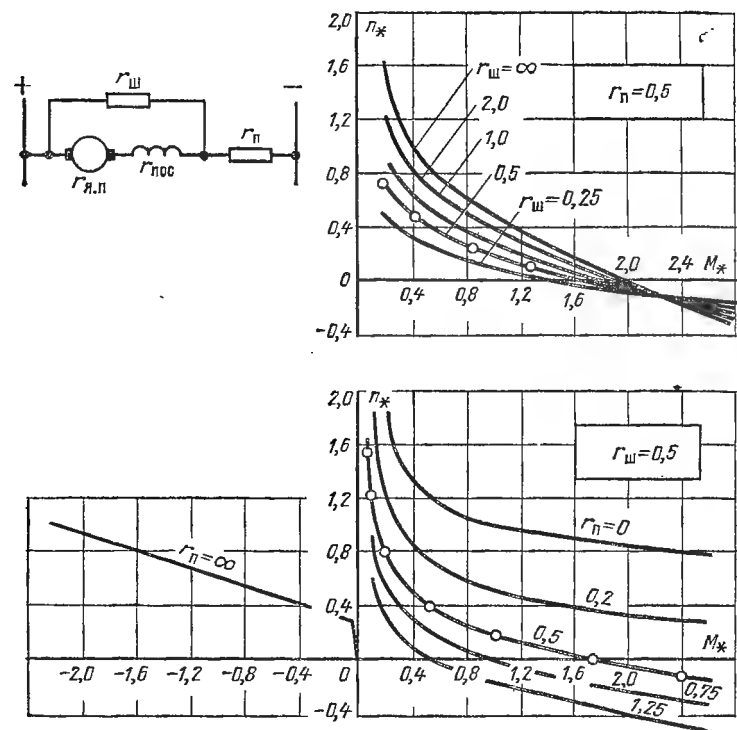


Рис. 2-51. Шунтирование резистором якоря и последовательной обмотки возбуждения.

Схема рис. 2-51 осуществляет одновременное шунтирование резистором якоря и последовательной обмотки возбуждения. Это — схема включения двигателя через делитель напряжения, при котором двигателю подается частичное напряжение, не столь сильно зависящее от тока нагрузки, как при последовательном включении резистора. Поэтому механические характеристики получаются более

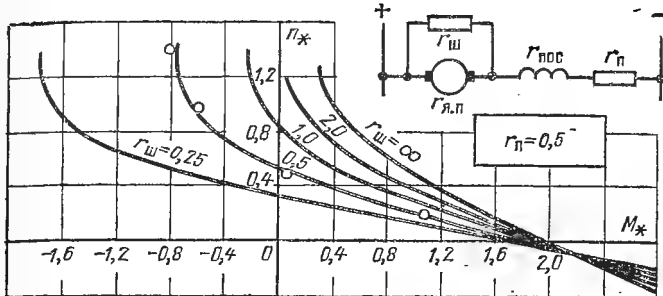


Рис. 2-52. Шунтирование резистором якоря.

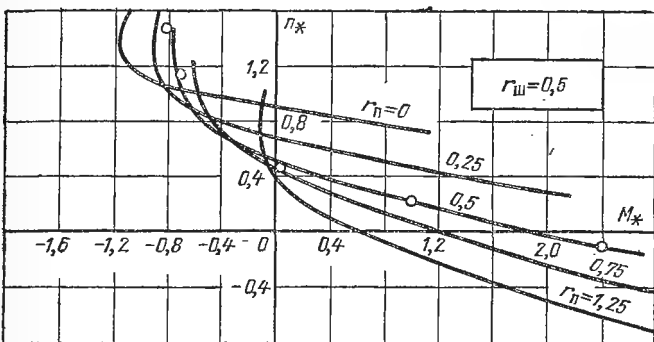


Рис. 2-53. Шунтирование резистором последовательной обмотки возбуждения.

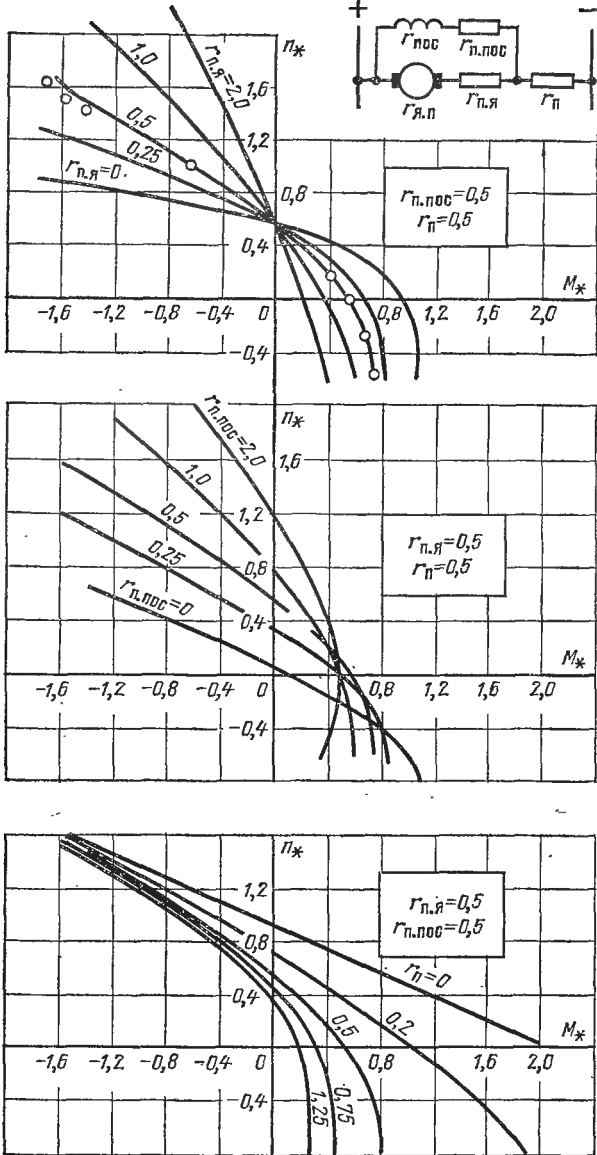


Рис. 2-54. Параллельное включение якоря и последовательной обмотки возбуждения.

пологие и, следовательно, более устойчивые. Такая схема применяется для крановых приводов и осуществляется на первых положениях контроллера.

Схема рис. 2-52 осуществляет шунтирование резистором только якоря двигателя. Благодаря подпитке последовательной обмотки возбуждения током, проходящим через шунтирующий резистор, двигатель может устойчиво работать при малых статических моментах, а также при отрицательных моментах. Переход с большей частоты вращения на меньшую происходит быстро в генераторном режиме. Такая схема применяется для получения предварительного замедления двигателя перед остановкой и для приводов с перетягивающей нагрузкой.

Схема рис. 2-53 осуществляет шунтирование резистором последовательной обмотки возбуждения, что вызывает ослабление поля двигателя и повышение частоты вращения. Эта схема находит применение в тяге. Следует учитывать, что характеристики получаются малоустойчивые при малых статических моментах.

Схема рис. 2-54 осуществляет параллельное включение последовательной обмотки возбуждения с якорем через сопротивления резистора. Благодаря такой схеме оказывается возможным получить механические характеристики такие, как у двигателя постоянного тока параллельного возбуждения или у асинхронного двигателя с ярко выраженным критическим моментом. Эти характеристики являются очень рациональными для приводов подъема в крановых установках. Они обеспечивают устойчивые малые и большие частоты вращения силового спуска пустого крюка и малых грузов и спуска в генераторном режиме средних и больших грузов.

В табл. 2-7—2-10 даны формы расчета механических характеристик двигателя последовательного возбуждения при комбинированных схемах включения. Эти таблицы действительны как для абсолютных, так и для относительных значений.

Сущность расчета заключается в том, что для любых схем соединения двигателя могут быть определены искусственные момент и частота вращения из очевидных равенств:

$$M_{\text{и}} = M \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{в}}}; \quad (2-79)$$

$$n_{\text{и}} = \frac{E_{\text{и}}}{(E/n)_{\text{е}}}, \quad (2-80)$$

Расчет характеристик двигателя для схемы рис. 2-51 (шунтирование резистором якоря и последовательной обмотки возбуждения)

Естественная характеристика						Искусственная характеристика							
$r_{я. п}, r_{пос}$ известны			$I_B r_d$	E	$\left(\frac{E}{n}\right)_e$	$r_n, r_{ш}$ заданы							
I_B	M	n				$I_{я} = I_B$	$I_{п}^*$	$I_{ш}$	$I_{ш} r_{ш}$	$I_B (r_{я. п} + r_{пос})$	E_n	M_n	n_n
			A	$U_n - A$			$\frac{U_n + I_B r_{ш}}{r_n + r_{ш}}$	$I_n - I_B$	B	C	$B - C$	M	$\frac{E_n}{(E/n)_e}$

* По схеме рис. 2-51 ток $I_{п}$ в последовательном резисторе определяется из двух равенств: $I_B + I_{ш} = I_{п}$ и $I_{ш} r_{ш} + I_{п} r_{п} = U_n$, откуда $I_{п} = \frac{U_n + I_B r_{ш}}{r_{п} + r_{ш}}$.

Расчет характеристик двигателя для схемы рис. 2-52 (шунтирование резистором якоря)

Естественная характеристика						Искусственная характеристика								
$r_{я. п}, r_{пос}$ известны			$I_B r_d$	E	$\left(\frac{E}{n}\right)_e$	$r_{п}, r_{ш}$ заданы								
I_B	M	n				$I (r_{пос} + r_{п})$	$I_{ш} r_{ш}$	$I_{ш}$	$I_{я}$	$I_{я} r_{я. п}$	$E_{и}$	$I_{я}/I_B$	$M_{и}$	$n_{и}$
						B	$U_{и} - B = C$	$\frac{C}{r_{ш}}$	$I_B - I_{ш}$	D	$C - D$		$M \frac{I_{я}}{I_B}$	$\frac{E_{и}}{(E_c/n)_e}$

Расчет характеристик двигателя для схемы рис. 2-53
(шунтирование резистором последовательной обмотки возбуждения)

Естественная характеристика						Искусственная характеристика						
$r_{2.п.} \cdot r_{пос}$ известны			$I_B r_d$	E	$\left(\frac{E}{n}\right)_e$	$r_{ш}$ задано						
I_B	M	n				$I_{ш}$	$I_{я}$	$I_{я} \left(r_{я.п.} + \frac{r_{пос} r_{ш}}{r_{пос} + r_{ш}} \right)$	$E_{ш}$	$\frac{I_{ш}}{I_B}$	$M_{ш}$	$n_{ш}$
			A	$U_H - A$		$I \frac{r_{пос}}{r_{ш}}$	$I_B + I_{ш}$	B	$U_H - B$		$M \frac{I_{я}}{I_B}$	$\frac{E_{ш}}{(E/n)_e}$

Расчет характеристик двигателя для схемы рис. 2-54
(параллельное включение якоря с последовательной обмоткой возбуждения)

Естественная характеристика						Искусственная характеристика								
$r_{я. п.} \cdot r_{пос}$ известны			$I_B r_d$	E	$\left(\frac{E}{n}\right)_e$	$r_{п.} \cdot r_{п. пос.} \cdot r_{п. я}$ заданы								
I_B	M	n				$I_B (r_{пос} + r_{п. пос.})$	$I_{п} r_{п}$	$I_{п}$	$I_{я}$	$I_{я} (r_{я. п} + r_{п. я})$	$E_{и}$	$\frac{I_{я}}{I_{п}}$	$M_{и}$	$n_{и}$
						B	$U_{и} - B = C$	$\frac{C}{r_{п}}$	$I_{п} - I_B$		$B - D$		$M \frac{I_{я}}{I_B}$	$\frac{E_{и}}{(E/n)_e}$

где $I_{\text{в}}$, $I_{\text{я}}$ — ток последовательной обмотки возбуждения и якоря; M — момент двигателя при $I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$; $E_{\text{н}}$ — э. д. с. якоря двигателя при данных $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{я}}$; $(E/n)_{\text{с}}$ — поток при данном $I_{\text{в}}$.

Таблицы построены так: для принятых значений $I_{\text{в}}$ (первый столбец) и известных для этого тока из естественных характеристик момента M и частоты вращения n (второй и третий столбцы) последовательно определяются составляющие формул искусственных моментов и частот вращения (2-79) и (2-80). Выражения в таблицах составлены, исходя из направлений токов в якоре, последовательной обмотке возбуждения и добавочных резисторах, согласных приложенному напряжению, а э. д. с. якоря принята направленной против приложенного напряжения, следовательно, против тока якоря, что соответствует двигательному режиму.

Случай, когда в расчетах получаются отрицательные знаки токов и э. д. с., указывают на то, что действительные направления тока и э. д. с. противоположны принятым.

На некоторых механических характеристиках рис. 2-51—2-54 показаны малыми кружками точки для случая учета реакции якоря, рассчитанной по данным § 2-18.

2-18. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ В СХЕМАХ ШУНТИРОВАНИЯ

Опытные и расчетные естественные характеристики двигателей, получаемые от заводов — изготовителей электрических машин, учитывают реакцию якоря, поэтому рассчитанные на их основе искусственные характеристики в двигательном режиме при токах якоря, равных токам последовательной обмотки возбуждения, также учитывают реакцию якоря.

Ниже даются способы учета реакции якоря для комбинированных схем, когда ток якоря не равен току последовательной обмотки, и для генераторного режима (рекуперация энергии в сеть, динамическое торможение, противовключение), когда даже при равных токах якоря и последовательной обмотки возбуждения реакции якоря отличаются от получаемой при двигательном режиме.

В двигателях различают два вида реакции якоря: поперечную и продольную.

1. ПОПЕРЕЧНАЯ РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Известно, что поперечная м. д. с. якоря, т. е. м. д. с., образованная током в обмотках якоря и направленная в якоре поперек главным полюсам, вызывает ослабление

потока под одним краем главного полюса и усиление под другим. В насыщенной машине это приводит к ослаблению общего потока полюсов, так как поток усиливается меньше, чем ослабляется. На рис. 2-55 иллюстрируется взаимодействие поперечной м. д. с. F_{aq} с м. д. с. главных полюсов F для генераторного и двигательного режимов.

Для того чтобы легче было сравнивать реакцию якоря в этих двух режимах, примем одинаковое направление вращения якоря и одинаковое направление м. д. с. главных полюсов. Тогда получат противоположные направления ток якоря, поперечная м. д. с. якоря F_{aq} и м. д. с. добавочных полюсов.

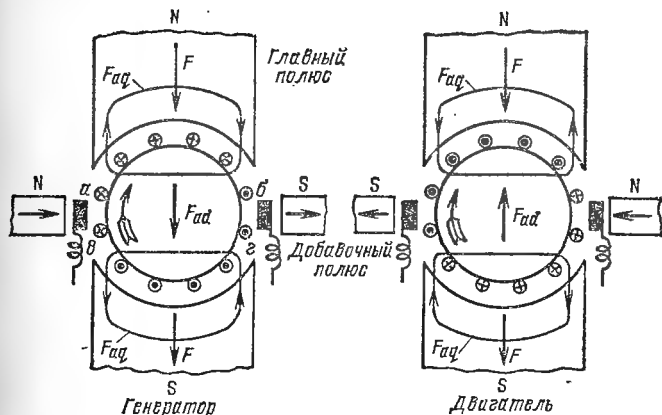


Рис. 2-55. Влияние м. д. с. поперечной реакции якоря F_{aq} и м. д. с. реакции коммутационных токов F_{ad} на м. д. с. главных полюсов F .

В обоих режимах поперечная м. д. с. якоря дает одинаковый количественный эффект, меняются лишь ролями правая и левая половины полюса.

Для учета явления поперечной м. д. с. якоря строится переходная кривая намагничивания рис. 2-56, дающая индукции B_δ в воздушном зазоре двигателя в зависимости от м. д. с. $(F_\delta + F_z)/2$, которая тратится на проведение основного потока через воздушный зазор и через зубцы под одним полюсом. Остальными участками магнитного потока от поперечной м. д. с. якоря можно пренебречь, так как их магнитные сопротивления ничтожны.

Если м. д. с. F главного полюса равна OP , то при холостом ходе получим индукцию B_δ , равную PA . При некото-

ром токе якоря мы получим поперечную м. д. с. якоря $F_{aq} = \tau AS$, из которой под полюсным наконечником вследствие рассеяния потока будет действовать лишь часть α , т. е.

$$\alpha F_{aq} = \alpha \tau AS = b' AS,$$

где AS — линейная нагрузка на окружности якоря, А/м; τ — полюсная дуга, м; b' — расчетная полюсная дуга, м.

У концов полюсного наконечника будет действовать м. д. с. $b' AS/2$, с одной стороны размагничивающая, с другой — намагничивающая. Откладывая эту м. д. с. влево

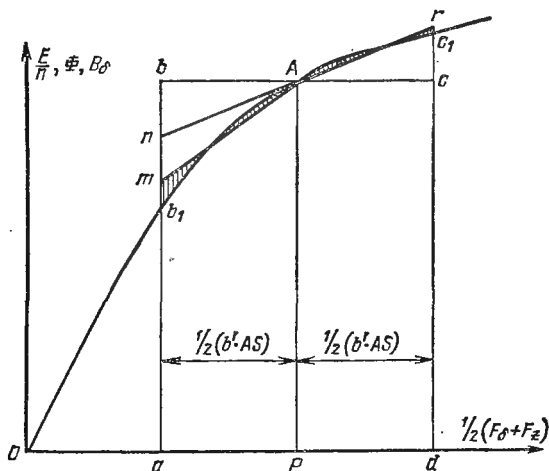


Рис. 2-56. Графическое определение поперечной реакции якоря.

и вправо от точки P , получаем кривую b_1Ac_1 распределения индукции под полюсом. Площадь ab_1c_1d , ограниченная этой кривой, является мерой магнитного потока при данном токе якоря, тогда как площадь $abcd$ — при холостом ходе. Очевидно, что уменьшение общего потока главного полюса будет определяться разностью площадей криволинейных треугольников b_1bA и Ac_1c .

Можно применить простой и удобный для расчетов способ определения уменьшения потока без планиметрирования этих криволинейных треугольников, заключающийся в следующем [Л. 11]. Кривые b_1A и Ac_1 заменяются на прямые mA и Ar таким образом, чтобы площади треугольников остались равновеликими. Продолжив прямую rA до пересечения в точке n , получим равновеликие треугольники Abn и Acr . Очевидно, что уменьшение потока определяется

площадью треугольников mnA , равной $mnA/2$. Уменьшение потока $\Delta\Phi_p$ от поперечной реакции якоря относительно потока Φ_0 холостого хода получится:

$$\frac{\Delta\Phi_p}{\Phi_0} = \frac{\text{площ } mnA}{\text{площ } abcd} = \frac{mn \cdot bA/2}{2ab \cdot bA} = \frac{mn}{4ab}. \quad (2-81)$$

При помощи этих построений получены кривые намагничивания двигателя при разных токах (разных AS), как показано на рис. 2-57 сплошными кривыми для $I_{я*} = 1$ и 2. Для этого нужно иметь кривую намагничивания холостого

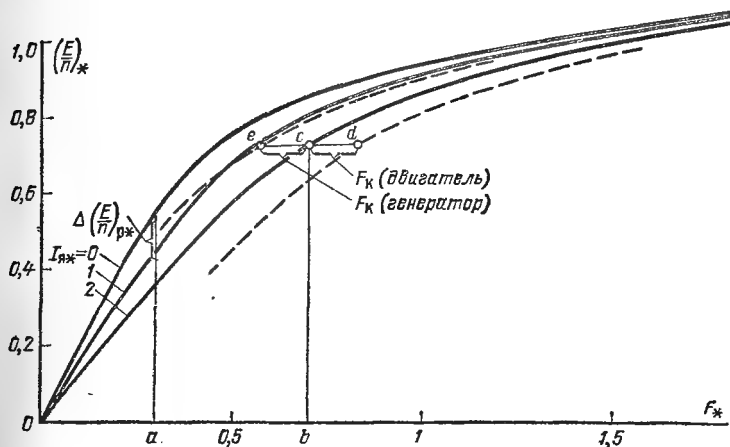


Рис. 2-57. Кривые намагничивания двигателя при разных токах якоря. Сплошные кривые — при $I_{я*} = 0$; 1 и 2 при действии только поперечной реакции якоря; пунктирные кривые — при $I_{я*} = 2$ и добавочном действии еще продольной реакции якоря от коммутационных токов.

хода ($I_a = 0$), ординаты которой (Φ или E/n) нужно уменьшать на $\Delta\Phi_p$ или $\Delta \left(\frac{E}{n}\right)_{p*}$, разные для разных м. д. с. возбуждения и токов якоря. Из рис. 2-57 видно, что влияние поперечной реакции якоря наибольшее на колене кривой намагничивания и уменьшается в зонах ненасыщенного и насыщенного двигателя.

2. ПРОДОЛЬНАЯ РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Продольная реакция якоря F_{ad} , т. е. м. д. с. якоря, действующая в продольном направлении к главным полюсам, создается тремя видами реакций: 1) реакцией тока якоря; 2) реакцией добавочных полюсов и 3) реакцией коммутационных токов.

Эта реакция создается главным током, проходящим вынужденно через витки якоря, попавшие в область чужих полюсов при сдвиге щеток с геометрической нейтрали.

Из рис. 2-55 можно видеть, что при сдвиге щеток по направлению вращения якоря м. д. с. от токов вынужденного направления уменьшит поток полюсов в генераторе и увеличит — в двигателе. При повороте щеток против вращения якоря действие м. д. с. получится обратным.

Сдвиг щеток с геометрической нейтрали может возникнуть из-за погрешности в установке траверсы со щетками, игры щеток в обоймах, износа щеток и неправильного их касания к коллектору.

Поэтому эта реакция якоря, зависящая от случайностей, не вводится в расчет характеристик двигателей, так же как и случайные колебания напряжения сети, хотя в отдельных специальных случаях может потребоваться учет этих случайных отклонений.

РЕАКЦИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

При сдвиге щеток с геометрической нейтрали поток добавочных полюсов будет индутировать э. д. с. в витках якоря, попавших под чужой полюс, причем всегда такого направления, что будет усиливаться действие «реакции тока якоря», т. е. при повороте щеток по направлению вращения якоря поток главных полюсов уменьшится в генераторе и увеличится в двигателе, а при повороте щеток против вращения якоря реакция добавочных полюсов изменится на обратную.

Реакция добавочных полюсов не учитывается в расчетах характеристик двигателей по тем же причинам, что и реакция тока якоря.

РЕАКЦИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ТОКОВ

Для уменьшения искрения под щетками обычно осуществляют ускоренную коммутацию, т. е. ускоренное, с опережением, изменение тока в короткозамкнуемой щетками секции путем создания избыточного сильного поля добавочных полюсов. Нетрудно видеть из рис. 2-55, что это приводит к усилению потока полюсов в генераторном режиме (см. провода в короткозамкнутой секции на якоре *a* — *б* и *в* — *г*) и ослаблению потока в двигательном режиме. По данным В. Т. Касьянова [Л. 11] м. д. с. от коммута-

ционных токов при ускоренной коммутации может быть определена по формуле

$$F_k \approx b_k AS/6 \quad (2-82)$$

(коэффициент $1/6$ может колебаться в пределах $0,12—0,2$), где b_k — ширина коммутационной зоны, вычисляемая по формуле

$$b_k = t_1 + \frac{D_{\text{я}}}{D_k} \left[b_{\text{щ}} + \beta_k \left(\frac{k}{2p} - y_1 - \frac{a}{p} \right) \right], \quad (2-83)$$

где t_1 — зубцовый шаг; $D_{\text{я}}$, D_k — диаметры якоря и коллектора; $b_{\text{щ}}$, β_k — ширина щетки и коллекторного деления; k , $2p$ — число коллекторных пластин и число полюсов; y_1 — шаг обмотки, выраженный числом коллекторных делений.

На рис. 2-57 показано, как учесть реакцию коммутационных токов дополнительно к поперечной реакции якоря. Для какой-либо м. д. с. полюса $F = Ob$ находим, например, при $I_{\text{я}*} = 2$ точку c . Далее, для двигательного режима, когда коммутационные токи размагничивают полюсы, нужно добавить м. д. с. $F_k \approx b_k AS/6$ (точка d), а для генераторного режима, когда коммутационные токи подмагничивают полюсы, вычесть F_k (точка e). Таким способом можно построить всю характеристику, как показано пунктиром.

Приведенные способы расчета реакции якоря требуют знания многих параметров двигателей и кропотливы. Чтобы упростить расчеты, автором рассчитаны и построены для серии краново-металлургических двигателей последовательного возбуждения универсальные вспомогательные кривые (рис. 2-58), позволяющие быстро определить коэффициент действительного потока K , учитывающий поперечную реакцию якоря и продольную реакцию коммутационных токов по току $I_{\text{в}*}$ обмотки возбуждения и току якоря $I_{\text{я}*}$, известных из расчетных табл. 2-7—2-10.

Коэффициент действительного потока K показывает, какую долю составляет поток при неравенстве токов якоря и обмотки возбуждения от потока при равенстве этих токов.

Для определения с учетом реакции якоря искусственного момента $M_{\text{и.р}}$ и искусственной частоты вращения $n_{\text{и.р}}$ по рассчитанным в табл. 2-7—2-10 значениям $M_{\text{и}}$ и $n_{\text{и}}$ без учета реакции якоря (крайние правые два столбца) нужно изменить последние в отношении K , а именно:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{и.р}} &= M_{\text{и}} K; \\ n_{\text{и.р}} &= n_{\text{и}} \frac{1}{K} \end{aligned} \right\} \quad (2-84)$$

На некоторых кривых рис. 2-51—2-54 показаны кружками точки, соответствующие учету реакции якоря, на основании которых можно сделать заключение, что реакция якоря мало влияет на механические характеристики дви-

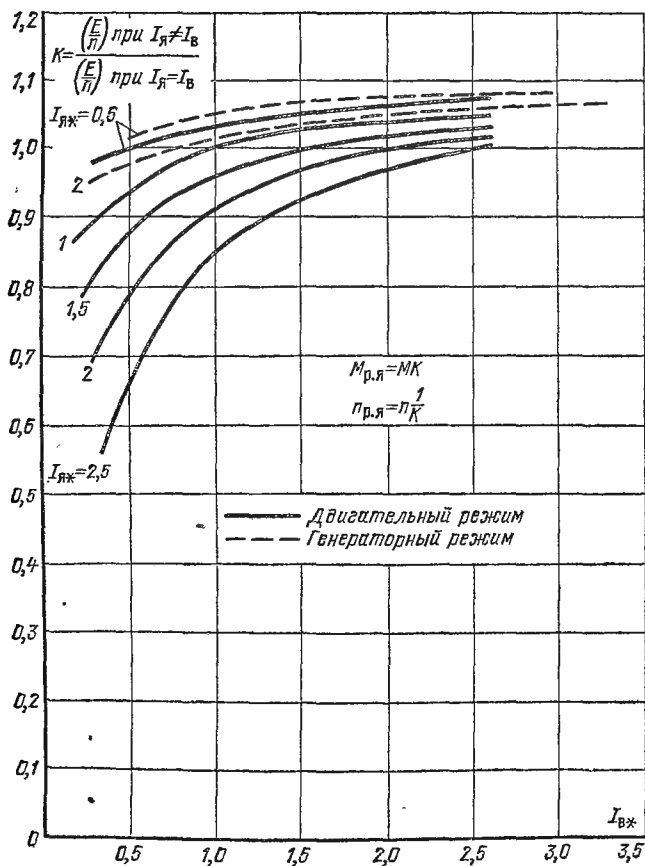


Рис. 2-58. Универсальные кривые коэффициента действительного потока K , учитывающего реакцию якоря, для двигателей последовательного возбуждения типов МП и ДП.

гателя последовательного возбуждения в схемах шунтирования. Исключение составляет схема шунтирования резистором последовательной обмотки возбуждения (рис. 2-53), где реакция якоря приводит к заметному повышению частоты вращения двигателя.

Универсальные кривые рис. 2-58 рассчитаны на основании материалов завода «Динамо» (подробных параметров двигателей и опытных кривых намагничивания двигателей при различных токах якоря). На кривых рис. 2-58 видно, что большое снижение коэффициента K получается в двигательном режиме при малых токах возбуждения и больших токах якоря (сплошные кривые) из-за одновременного размагничивающего действия поперечной реакции и продольной реакции коммутационных токов. Так, например, при $I_{в*} = 0,5$ и $I_{я*} = 2,5$ получим $K = 0,65$. Это означает, что из-за реакции якоря момент двигателя снижается до 0,65, а частота вращения повышается в полтора раза относительно рассчитанных без учета реакции якоря.

Интересно, что в генераторном режиме коэффициент K лишь немногим больше единицы (пунктирные кривые). Это объясняется подмагничивающим действием коммутационных токов вместо размагничивающего в двигательном режиме. Очевидно, что в генераторном режиме можно не вводить в расчеты поправочный коэффициент K , так как он близок к единице.

2-19. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В подъемно-транспортных устройствах и в электрическом транспорте, где находят применение двигатели последовательного возбуждения, используются широко три основные схемы: 1) схема пуска последовательными резисторами со ступенью противовключения; 2) схема последовательно-параллельного включения двигателей двухдвигательного привода; 3) схема привода подъема с регулированием скорости подъема и спуска.

Первый тип схемы является простейшим и применяется обычно для приводов моста и тележки кранов. Один из видов такой схемы с двумя ступенями ускорения и одной ступенью противовключения приведен на рис. 2-22 (если исключить показанную параллельную обмотку). Рассмотрим два других типа указанных выше схем.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Последовательно-параллельное включение двигателей применяется для самоходных вагонов, электровозов, скиповых подъемников доменных печей и некоторых других

приводов. Во всех этих случаях двигатели связаны между собой механически или через рельсы. Достоинством последовательно-параллельного включения является возможность работы с устойчивой половинной частотой вращения при последовательном включении двигателей без потерь в резисторе, а также большое число ступеней ускорения при сравнительно небольшом числе контакторов.

На рис. 2-59 показаны схемы главных цепей и механические характеристики для этой системы. Двигатели сначала включаются в сеть последовательно через сопротивление резистора, ступени которого постепенно закорачиваются, пока двигатели не окажутся последовательно включенными на полное напряжение сети. Кривая 1 есть кривая противовключения и одновременно она обеспечивает предварительный момент при пуске; кривые 2 — 5 являются кривыми ускорения при последовательном включении двигателей. Затем двигатели включаются параллельно и одновременно вводятся в их цепи пусковые резисторы, которые снова закорачиваются по ступеням, пока двигатели не окажутся включенными каждый на полное напряжение сети. Ускорение при параллельном включении будет происходить по кривым 6—8. Последовательность замыкания контакторов приведена рядом с соответствующими кривыми и отдельно выше показаны элементы схем, обозначенные теми же порядковыми цифрами, что и кривые.

Данная схема по сравнению с другими известными схемами последовательно-параллельного включения имеет то преимущество, что переключение с последовательного соединения в параллельное, т. е. переход с кривой 5 на 6, происходит без разрыва цепи и без понижения момента двигателей.

При замкнутом контакторе $3У$ и разомкнутых $1УА—1УБ$, $2УА—2УБ$ и $С$, т. е. когда двигатели включены последовательно без добавочных резисторов в цепи (кривая 5), закрываются линейные контакторы $ЛА—ЛБ$. Двигатели включаются параллельно в сеть через полное сопротивление пускового резистора, образуя диагональ моста контактами $3У$ между точками ступеней резистора $P2—P8$ (см. элемент схемы 5—6). Если сопротивления плеч $P2—P4$ и $P6—P8$ выбрать равными, то через диагональ моста ток протекать не будет. Поэтому последующее размыкание контактора $3У$ произойдет без обрыва тока и переведет двигатели на чистое параллельное соединение с полными сопротивлениями плеч пускового резистора (кривая 6).

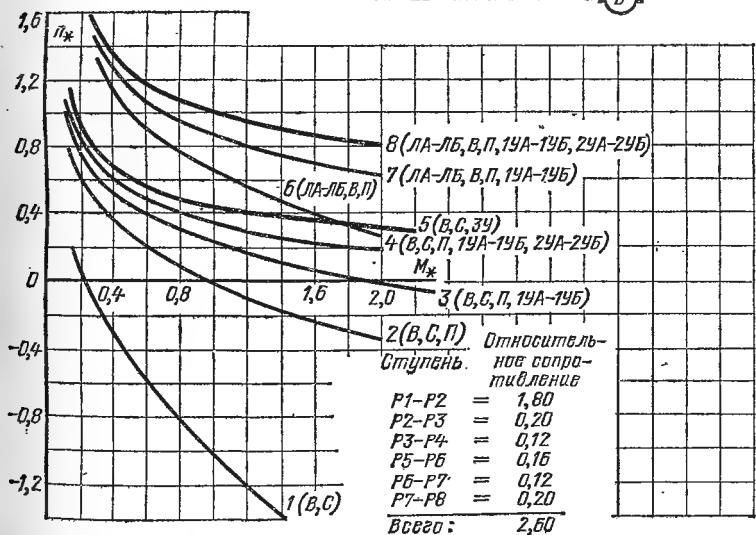
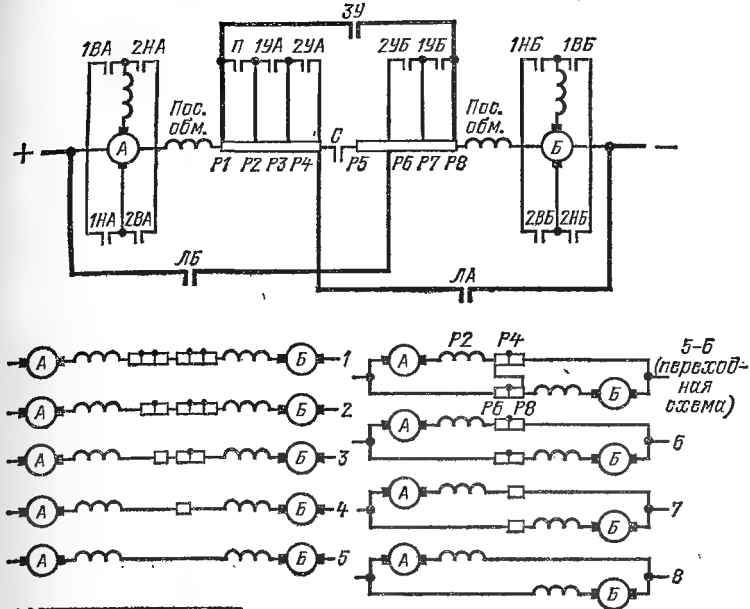


Рис. 2-59. Схема главных цепей и механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при последовательно-параллельном управлении.

(Буква В на характеристиках условно указывает замкнутое положение контактов контакторов: 1ВА — 2ВА, 1ВБ — 2ВБ или 1НА — 2НА, 1НБ — 2НБ).

Наряду с отмеченными преимуществами схемы последовательно-параллельного включения она имеет и некоторый недостаток, заключающийся в том, что при торможении противовключением с больших частот вращения в силовой цепи возникают значительные напряжения, так как в этом случае э. д. с. обоих двигателей складывается с напряжением сети (см. точки $P1 - P8$).

Расчет механических характеристик двигателей при последовательном включении нетрудно выполнить аналогично тому, как это показано для одного двигателя. Задаваясь различными токами двигателя I , определяем соответствующие моменты M (см. рис. 2-41) и потоки $(E/n)_e$ (см. рис. 2-42 или табл. 2-6). Затем, считая э. д. с. двух последовательно соединенных и механически связанных двигателей одинаковыми, находим э. д. с. одного двигателя из искусственной характеристики для данного сопротивления резистора в цепи двигателей

$$E_n = \frac{U_n - I(2r_d + r_v)}{2}. \quad (2-85)$$

Частоты вращения для принятых токов найдутся:

$$n_n = \frac{E_n}{(E/n)_e}. \quad (2-86)$$

Расчет характеристик двигателей при последовательном включении удобно вести при помощи той же табл. 2-6, как для одного двигателя, в которой первые шесть столбцов, относящиеся к естественной характеристике, остаются без изменений, в седьмом столбце R нужно также считать как полное сопротивление цепи, состоящей из внутренних сопротивлений двух двигателей ($2r_d$) и полного сопротивления резистора (r_v). В восьмом столбце нужно брать для одного двигателя половину общей э. д. с., как дано в (2-85).

На рис. 2-59 даны рекомендуемые сопротивления ступеней резистора для получения приведенных механических характеристик. Следует обратить внимание, что ступень резистора $P5 - P6$ полезна не только как добавочная ступень ускорения, но она необходима для предупреждения короткого замыкания в том случае, если при переходе с последовательного на параллельное соединение двигателей дуга на контактах контактора 3У задержится еще к тому моменту, когда включатся линейные контакторы ЛА и ЛБ.

Эта схема является наиболее сложной для двигателей последовательного возбуждения потому, что двигатель должен обеспечивать много различных режимов.

Нагрузка кранов может меняться от нуля до очень больших значений при спуске или подъеме пустого крюка. Наиболее сложными являются условия управления спуском. Пустой крюк не в состоянии преодолеть силы трения в приводе, и для опускания его двигатель должен развивать небольшой момент в направлении спуска. При опускании больших грузов, преодолевающих силы трения в приводе и перетягивающих двигатель, должны быть предусмотрены средства для ограничения и регулирования частоты вращения.

Особенно сложными являются схемы управления приводом подъема у крупных грейферных кранов. Более простую схему имеют приводы у обычных мостовых кранов.

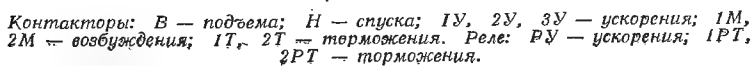
На рис. 2-60 показана схема типа ПС для управления двигателем последовательного возбуждения привода подъема на кранах для двигателей мощностью от 20 до 150 кВт, 220 и 440 В, а соответствующие механические характеристики даны на рис. 2-61.

Характеристики названы положениями командоконтроллера, при которых они получаются (рис. 2-62). Сплошные характеристики свойственны определенным положениям командоконтроллера, и двигатель может оставаться на них столько времени, сколько задерживается рукоятка на данных положениях. Пунктирные характеристики являются переходными; длительность нахождения двигателя на каждой из них небольшая (0,5—1 с) и определяется уставками реле и собственными временами срабатывания контакторов.

Рассмотрим работу двигателя при подъеме и спуске груза.

а) П о д ъ е м. Если для данного крана не требуется иметь низкие скорости подъема, то контакты 8 командоконтроллера K делаются замкнутыми в положениях подъема 1 и 2. В этом случае двигатель пускается через сопротивление последовательного резистора. На первом положении получится характеристика 1, на втором и третьем — 2, 3 и при переводе на четвертое — одна переходная 4а и затем естественная 4.

Если необходимо иметь при подъеме низкие устойчивые частоты вращения, то контакты 8 командоконтроллера де-



даются разомкнутыми в положениях подъема 1 и 2. Тогда на первом и втором положениях командоконтроллера якорь вместе с обмоткой возбуждения шунтируется резистором, и мы получим характеристики 1Ш и 2Ш, которые могут дать низкие частоты вращения даже при малых грузах.

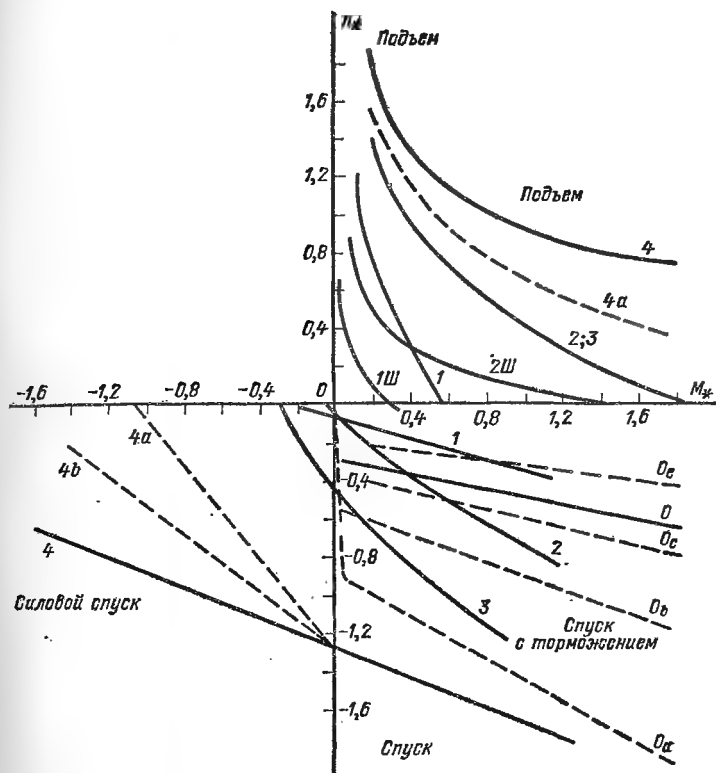


Рис. 2-61. Характеристики подъема и спуска для двигателя привода подъема (схема рис. 2-60).

б) С п у с к. На первом положении командоконтроллера в направлении спуска якорь и обмотка возбуждения включаются параллельно в сеть через общее сопротивление последовательного резистора. Двигатель при включении развивает момент около 0,25 номинального, этот момент достаточен для преодоления всех сил трения при спуске пустого крюка. Согласно этой характеристике спуск пустого крюка или малых грузов производится силой (двигателя).

Режим	Положения командо-контроллера	Контуры силовых цепей, обтекаемых током	Обозначение характеристик	Примечания
Стоп	Спуск в Подъем		0	
Подъем	1		1	Контакт в командо-контроллера закрыт в положениях 1 и 2 (рис. 2-60)
	2-3		2-3	
	4а		4а	Переходная
	4		4	
	1Ш		1Ш	Контакт в командо-контроллера закрыт в положениях 1 и 2 (рис. 2-60)
	2Ш		2Ш	
Спуск	1		1	
	2		2	
	3		3	
	4а		4а	Переходная
	4б		4б	—
	4		4	
Остановка	0а		0а	Переходная
	0б		0б	—
	0с		0с	—
	0е		0е	—
	0		0	

Рис. 2-62. Контуры силовых цепей двигателя привода подъема на разных положениях командоконтроллера (рис. 2-60 и 2-61).

тельный режим) с небольшой частотой вращения — до $0,1 n_n$. При спуске грузов, преодолевающих трение в передачах, двигатель сам переходит в генераторный режим и тормозит привод; при номинальном моменте частота вращения двигателя равна всего лишь $0,35 n_n$. Таким образом обеспечивается небольшая скорость спуска при любых грузах в пределах грузоподъемности крана.

На втором положении командоконтроллера вводится резистор в цепь якоря, отчего получается характеристика 2, дающая повышенные частоты вращения при спуске грузов.

На третьем — вводится резистор в цепь обмотки возбуждения, магнитный поток уменьшается и частота вращения двигателя еще больше увеличивается.

На четвертом — закорачивается общий последовательный резистор и обмотка возбуждения с добавочным резистором включается непосредственно в сеть. Двигатель становится параллельного возбуждения, так как ток обмотки возбуждения постоянен и не зависит от тока якоря.

При переводе командоконтроллера в четвертое положение получают две переходные характеристики 4а и 4б, как у двигателя параллельного возбуждения, и затем характеристика 4 с невыключаемым резистором с небольшим сопротивлением в цепи якоря. Характеристика 4 дает высокие частоты вращения силового спуска пустого крюка или малых грузов и также высокие частоты вращения тормозного режима при спуске тяжелых грузов.

Большим достоинством рассматриваемой схемы является обеспечение безопасной скорости спуска любых грузов и возможность регулирования скорости в больших пределах, например при номинальном моменте можно иметь на первом, втором, третьем и четвертом положениях командоконтроллера соответственно скорости спуска 0,3; 0,7; 1,2 и 1,8 номинальной.

в). О с т а н о в к а. При постановке командоконтроллера на нуль осуществляется схема динамического торможения с самовозбуждением и двигатель замедляется. Эффективность динамического торможения поддерживается тем, что последовательно во времени закорачивается добавочный резистор. Таким образом, получают четыре переходные характеристики. Затем якорь переключается на малое сопротивление добавочного резистора и отключается обмотка механического тормоза, останавливающего окончательно привод. В случае отказа в работе механического тормоза

Стандартные значения сопротивлений ступеней резистора для двигателей, управляемых контакторной панелью типа ПС по схеме рис. 2-60

Ступень	Сопротивление (относительные значения)	Эквивалентный длительный ток (относительные значения)	Ступень	Сопротивление (относительные значения)	Эквивалентный длительный ток (относительные значения)
<i>P1—P4</i>	1,00	0,36	<i>P8—P9</i>	0,26	0,48
<i>P4—P5</i>	1,30	0,33	<i>P9—P10</i>	0,30	0,33
<i>P5—P6</i>	0,50	0,36	<i>P2—P3</i>	0,18	0,36
<i>P7—P8</i>	0,145	0,48			

груз опустится на землю с малой безопасной скоростью при самовозбуждении.

Характеристики динамического торможения с самовозбуждением отмечены знаком 0 с индексами.

В табл. 2-11 приведены стандартные значения сопротивлений для двигателей.

Расчет механических характеристик двигателей для схемы рис. 2-60 ведется, как указано в § 2-14, 2-16 и 2-17.

В. ДВИГАТЕЛИ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Двигатели смешанного возбуждения, внедрившиеся широко для вспомогательных механизмов прокатных станов, сейчас почти полностью вытеснены асинхронными двигателями и находятся в стадии отживания. Они применяются изредка для циклически работающих механизмов с динамическим торможением при остановках, обычно с большими частотами включений, при которых требуется принудительное охлаждение воздухом, продуваемым через двигатель. Такими приводами являются подъемные столы жестокатальных станов, привод подъема упора у ножниц блюминга и некоторые другие.

После освоения заводами электротехнической промышленности асинхронных двигателей продуваемого исполнения с принудительным охлаждением двигатели смешанного возбуждения будут применяться еще реже.

Однако мы рассмотрим двигатели смешанного возбуждения, поскольку они работают в большом количестве на действующих заводах.

2-20. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В двигателях смешанного возбуждения поток полюсов создается суммой м. д. с. параллельной и последовательной обмоток возбуждения.

У двигателей краново-металлургической серии МП м. д. с. последовательной обмотки возбуждения при номинальном токе примерно равна м. д. с. параллельной обмотки.

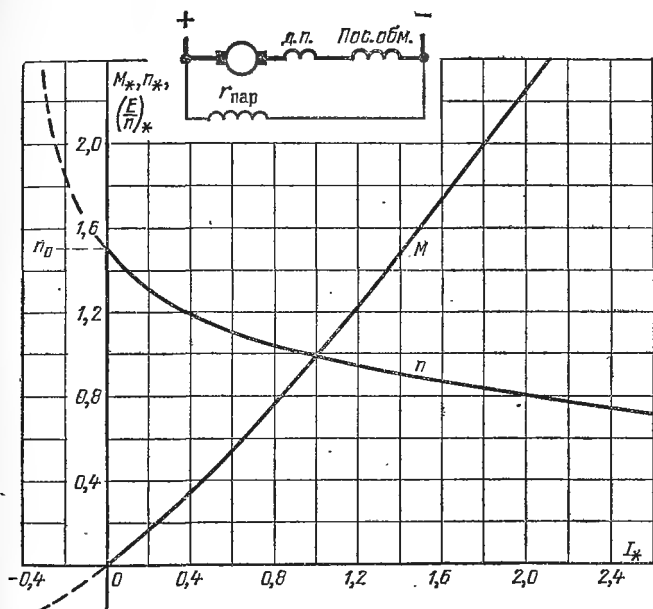


Рис. 2-63. Универсальные характеристики двигателей смешанного возбуждения типа МП.

На рис. 2-63 показаны универсальные естественные характеристики для двигателей смешанного возбуждения типа МП. Они являются средними и для некоторых двигателей дают расхождение до 10%.

Частота вращения, обозначенная n_0 , представляет собой частоту вращения идеального холостого хода, т. е. такую частоту вращения, при которой э. д. с. якоря равна номинальному напряжению. Через включенный в сеть двигатель

при частоте вращения идеального холостого хода не будет течь ток, поэтому при идеальном холостом ходе э. д. с. якоря генерируется исключительно потоком, созданным параллельной обмоткой. При появлении момента нагрузки частота вращения двигателя вначале резко снижается, а затем падает очень полого — почти по прямой, как у двигателя параллельного возбуждения. Это объясняется тем, что вначале, при малых моментах, когда магнитная система не насыщена, поток сильно возрастает от прибавления к постоянной м. д. с. параллельной обмотки м. д. с. последовательной обмотки; при больших моментах, а следовательно, и больших м. д. с. последовательной обмотки наступает насыщение магнитной системы двигателя и поток остается почти постоянным.

В двигателях смешанного возбуждения, так же как и в двигателях последовательного возбуждения, при токах, больших номинального, относительные моменты больше относительных токов.

Сравнивая их универсальные характеристики на рис. 2-63 и 2-41, видим, что для одинаковых относительных токов выше единицы относительные моменты двигателей последовательного возбуждения больше, чем у двигателей смешанного возбуждения, что объясняется большим ростом потока у первых, чем у вторых, при одинаковых увеличениях тока.

2. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

В двигателе смешанного возбуждения при токе в последовательной обмотке, равном нулю, благодаря параллельной обмотке поток достаточно велик, тогда как в двигателе последовательного возбуждения он незначителен и определяется лишь остаточным магнетизмом.

На рис. 2-64 показана универсальная кривая потока $(E/n)_* = f(I_{\text{пос}*})$ для двигателей смешанного возбуждения типа МП, рассчитанная по универсальным характеристикам рис. 2-63 для внутреннего сопротивления $r_{д*} = 0,06$, взятого из кривой рис. 2-3. Расчет для положительных токов последовательной обмотки велся так же, как и для двигателей последовательного возбуждения (§ 2-13). При частоте вращения выше n_0 и отрицательном токе последовательной обмотки, равном $I_{\text{пос}*} = -1$, будем иметь $E/n = 0$, так как при этом м. д. с. последовательной обмотки равна и противоположна м. д. с. параллельной обмотки.

Из характеристики рис. 2-64 мы видим, что поток, создаваемый м. д. с. параллельной обмотки двигателей типа МП смешанного возбуждения, составляет $0,667/0,94 = 0,71$ полного потока, создаваемого обеими обмотками возбуждения при номинальном токе в последовательной обмотке, между тем как м. д. с. параллельной обмотки составляет только 0,5 полной. Это свойство двигателей смешанного

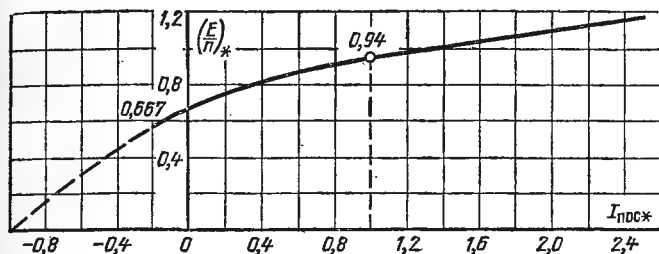


Рис. 2-64. Универсальная кривая магнитного потока для двигателей смешанного возбуждения типа МП при номинальном токе в параллельной обмотке.

возбуждения типа МП дает возможность получать достаточно эффективное динамическое торможение при потоке одной параллельной обмотки без подпитки последовательной обмотки, что позволяет сэкономить на аппаратуре, резисторах и уменьшить расход электроэнергии.

Поток, создаваемый одной параллельной обмоткой возбуждения, легко найти, зная частоту вращения идеального холостого хода, а именно:

$$\left(\frac{E}{n}\right)_{\text{пар}} = \frac{U_n}{n_0} \quad \text{или} \quad \left(\frac{E}{n}\right)_{\text{пар}*} = \frac{1}{n_{0*}}. \quad (2-87)$$

3. ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расчет и построение искусственных характеристик двигателей смешанного возбуждения при последовательных резисторах в силовой цепи ведутся точно так же, как и для двигателей последовательного возбуждения (§ 2-13).

На рис. 2-65 дано семейство искусственных механических характеристик для серии двигателей смешанного возбуждения.

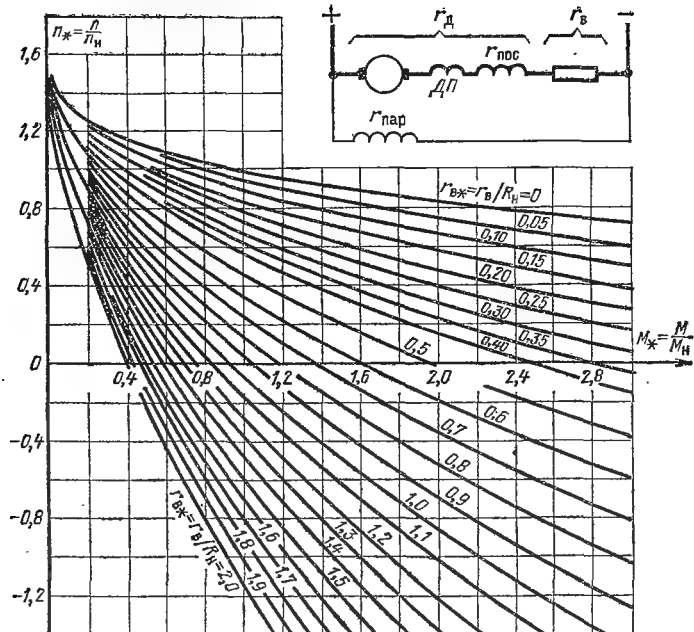


Рис. 2-65. Универсальные механические характеристики двигателей смешанного возбуждения типа МП.

Эти характеристики построены на основании естественных характеристик рис. 2-63 с учетом того, что внутреннее сопротивление двигателя $r_{d*} = 0,06$.

2-21. ПУСК

Методы расчета сопротивлений пусковых резисторов, указанные в § 2-14 для двигателей последовательного возбуждения, в полной мере применимы и для двигателей смешанного возбуждения.

Интересно здесь указать на применяемый иногда способ ускорения двигателя смешанного возбуждения выше номинальной частоты вращения закорачиванием последовательной обмотки. Схема такого управления и соответствующие пусковые характеристики даны на рис. 2-66. До естественной характеристики двигатель доходит обычным путем, т. е. уменьшением до нуля внешнего сопротивления. После того как двигатель ускорится по своей естественной харак-

теристике до частоты вращения, когда момент его станет близким статическому, контактор 3У закоротит последовательную обмотку и двигатель перейдет на характеристику, соответствующую магнитному потоку только от параллельной обмотки.

Таким образом, двигатель смешанного возбуждения при закороченной последовательной обмотке работает как двигатель параллельного возбуждения с той же частотой вращения идеального холостого хода.

Благодаря демпфирующему действию обмотки при закорачивании ее накоротко ток в ней падает с промедлением и потому переход на характеристику параллельного возбуждения осуществляется не мгновенно, а по кривой.

Следует отметить, что сопротивление главной цепи контактора 3У хотя и очень мало, но соизмеримо с сопротивлением последовательной обмотки, поэтому в последней будет продолжаться течь небольшой ток.

Подобные схемы управления двигателем смешанного возбуждения применяются в тех случаях, когда желательно иметь повышенные пусковые моменты и устойчивые частоты вращения или же требуется защитить двигатель от разноса в тех случаях, когда груз перетягивает

двигатель и заставляет вращаться его с частотой вращения выше идеального холостого хода, например опускание груженого скипа (см. пунктирную прямую на рис. 2-66).

Число ступеней пускового резистора для двигателя смешанного возбуждения, так же как и для двигателя последовательного возбуждения, может быть применено меньшее, чем для двигателя параллельного возбуждения, при одинаковых относительных изменениях тока. В качестве сравнения на рис. 2-67 даны пусковые характеристики двигателей всех трех систем возбуждения с одинаковыми переключающими моментами, равными номинальному, и приблизительно одинаковыми пиками моментов.

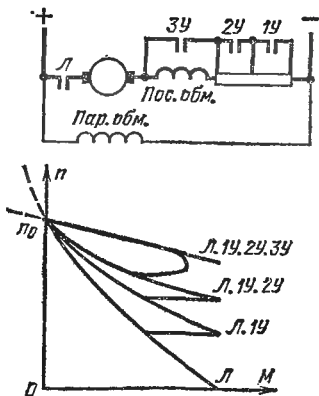


Рис. 2-66. Ускорение двигателя смешанного возбуждения закорачиванием последовательной обмотки.

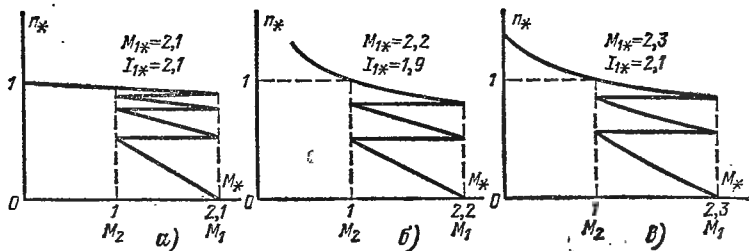


Рис. 2-67. Пусковые характеристики двигателей.

а — параллельное возбуждение; б — последовательное возбуждение; в — смешанное возбуждение.

Из приведенных пусковых характеристик следует, что двигатель параллельного возбуждения требует три ступени ускорения, тогда как двигатели последовательного и смешанного возбуждения — только две.

2-22. ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕ

Механические характеристики противовключения двигателей смешанного возбуждения показаны на рис. 2-65 в зоне частот вращения от 0 до $n_* = -1,4$.

Способы расчета ступени противовключения и точки присоединения реле противовключения для двигателей смешанного возбуждения те же, что и для двигателя последовательного возбуждения. Для выбора точки присоединения реле противовключения могут быть использованы с достаточной степенью точности кривые рис. 2-48.

2-23. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

На рис. 2-68 даны схемы силовых цепей и характеристики двигателя смешанного возбуждения для случаев динамического торможения с потоком от параллельной обмотки и с потоком от параллельной и последовательной обмоток вместе.

Поскольку во время динамического торможения поток постоянен, механические характеристики прямолинейны и проходят через начало координат, как для двигателей параллельного и последовательного возбуждения. Характеристика T относится к торможению по левой схеме с потоком только параллельной обмотки, а характеристика $ТП$. T — к торможению по правой схеме с тем же током

якоря (следовательно, с другим сопротивлением резистора r_T), но с током от параллельной и последовательной обмоток при номинальном токе в последней.

Хотя подпитка последовательной обмотки увеличивает м. д. с. вдвое, момент при данном токе якоря увеличивается в меньшей степени, что объясняется насыщением магнитной системы двигателя.

Для большинства обычных случаев эффективность торможения при одном потоке параллельной обмотки является

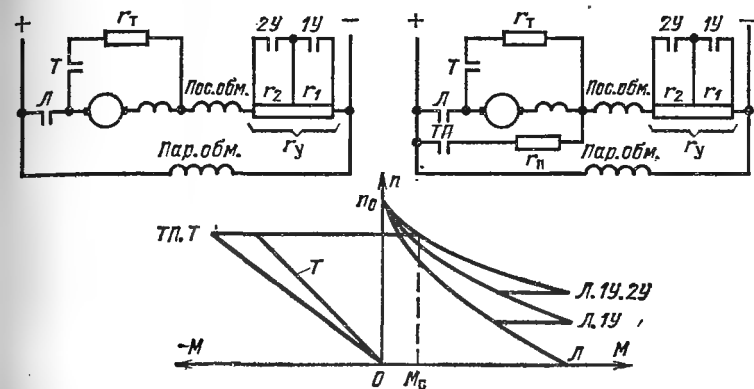


Рис. 2-68. Схемы и характеристики пусковые и динамического торможения для двигателя смешанного возбуждения.

удовлетворительной, и поскольку этот способ дает экономию в аппаратуре, резисторах и энергии, он имеет широкое применение. Торможение с подпиткой последовательной обмотки как более дорогой способ применяется реже и только в тех случаях, когда увеличение эффективности замедления привода имеет существенное значение.

Следует отметить, что добавление одного контактора для получения двух ступеней торможения при потоке только от параллельной обмотки дает несколько большую эффективность в смысле времени и пути замедления, чем добавление одного контактора для подпитки последовательной обмотки при одной ступени торможения.

2. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Для схем динамического торможения двигателя с подпиткой последовательной обмотки ток в ней принимается равным номинальному. В этом случае расчет сопротивлений

резисторов поля r_p и тормозного r_T ничем не отличается от приведенного в § 2-16 для двигателя последовательного возбуждения.

Если схема осуществляет динамическое торможение без участия последовательной обмотки, то в (2-75) максимально возможная э. д. с. $E_{\text{макс}}$ определится, исходя из потока только одной параллельной обмотки.

При вращении включенного в сеть двигателя смешанного возбуждения с частотой вращения идеального холостого хода его э. д. с. равна напряжению сети и через якорь и последовательную обмотку ток не протекает, а потому поток определяется одной параллельной обмоткой.

Поэтому

$$\frac{E_{\text{макс}}}{U_H} = \frac{n_{\text{макс}}}{n_0},$$

откуда

$$E_{\text{макс}} = U_H \frac{n_{\text{макс}}}{n_0}. \quad (2-88)$$

Частота вращения идеального холостого хода n_0 может быть взята из естественной характеристики двигателя, а максимально возможная частота вращения $n_{\text{макс}}$ определяется из той же характеристики по минимально возможному статическому моменту.

В случае нескольких ступеней динамического торможения э. д. с. якоря при соответствующих частотах вращения определяют также по формуле (2-88), считая вместо $n_{\text{макс}}$ частоту вращения для уменьшенного сопротивления резистора торможения.

Пример 2-12. Рассчитать сопротивление резистора динамического торможения для двигателя смешанного возбуждения типа МП-41, 12 кВт, 220 В, 64 А, 680 об/мин при ПВ = 25%. Торможение осуществляется одной ступенью с потоком одной параллельной обмотки, как на рис. 2-68 (левый). Минимально возможный статический момент равен $M_{c*} = 0,5$. Требуется быстрое замедление привода.

Решение. Сопротивление r_T определим по (2-75).

а) По универсальной характеристике рис. 2-63 имеем $n_{0*} = 1,5$; $n_{\text{макс}*}$ определяем для минимального возможного статического момента $M_{c*} = 0,5$. Получим $n_{\text{макс}*} = 1,12$. Определяем:

$$E_{\text{макс}} = \frac{n_{\text{макс}*}}{n_{0*}} = \frac{1,12}{1,5} = 0,75.$$

б) Примем при частоте вращения $n_{\text{макс}*} = 1,12$ допускаемый ток равным 2,5 (§ 1-2), тогда

$$r_{T*} = \frac{E_{\text{макс}*}}{I_{\text{доп}*}} - r_{\text{я.н}} = \frac{0,75}{2,5} - 0,085 = 0,215.$$

Определим $r_{т*}$:

$$R_H = \frac{U_H}{I_{H.H}} = \frac{220}{64} = 3,44 \text{ Ом};$$
$$r_T = r_{т*} R_H = 0,215 \cdot 3,44 = 0,74 \text{ Ом}.$$

2-24. СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ С ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ

Для сравнения способов торможения динамического с противовключением необходимо исходить из следующих положений: быстрота замедления, точность остановки, простота схемы, надежность торможения, расход электроэнергии.

Быстрота замедления. Для двигателей постоянного тока при равных токах якоря в начале торможения замедление противовключением более эффективно, чем динамическим торможением. Это объясняется тем, что при динамическом торможении момент уменьшается от максимального значения до нуля, а при противовключении — от максимального до некоторого значения, определяемого током неподвижного якоря с введенным полным сопротивлением пускового резистора.

Точность остановки. Поскольку при динамическом торможении момент двигателя падает до нуля, привод не может развернуться в обратную сторону, даже если бы схема динамического торможения сохранялась и после его остановки.

При торможении противовключением, если вовремя не отключить двигатель от сети, он начнет разворачиваться в обратную сторону. Практически трудно точно отключить двигатель от сети, как только частота вращения станет равной нулю. Если двигатель будет отключен раньше остановки, он может пройти на ползучей скорости некоторую добавочную часть пути. Если же двигатель отключится позже, то он начнет разворачиваться в обратную сторону и место окончательной остановки в результате получится с некоторым недоходом до требуемого.

Колебание напряжения в сети оказывает большее влияние на момент двигателя при противовключении, чем при динамическом торможении.

Указанные обстоятельства приводят к тому, что динамическое торможение дает более точную остановку привода, чем противовключение. Однако в некоторых случаях, когда статический момент привода имеет реактивный характер

и превышает момент неподвижного двигателя с введенным полным сопротивлением пускового резистора в силовую цепь, противовключение может дать точную остановку. В этом случае статический момент не позволит двигателю после режима противовключения разворачиваться в обратную сторону, а увеличенные моменты противовключения сравнительно с таковыми при динамическом торможении остановят двигатель на меньшем пути, следовательно, более точно.

Простота схемы. Если требуется электрическое торможение двигателя только для остановки привода, то схема динамического торможения значительно проще и получается с меньшим количеством аппаратов. Если торможение применяется для остановки привода с тем, чтобы немедленно его реверсировать, проще оказывается схема противовключения.

Надежность торможения. При исчезновении напряжения (например, отключился автомат питающей линии) режим противовключения не может быть получен и привод лишается торможения. Динамическое торможение с самовозбуждением или с питанием обмоток возбуждения от отдельного возбудителя эффективно и при исчезновении напряжения в сети. Аварийное торможение должно быть безотказно в работе, а потому в этих случаях применяется только динамическое торможение с самовозбуждением или с питанием обмоток возбуждения от отдельного возбудителя.

Расход электроэнергии. При частых торможениях двигателя противовключением забирается из сети значительная энергия.

При динамическом торможении двигателей с самовозбуждением из сети не расходуется энергия.

При динамическом торможении с независимым возбуждением двигателя параллельного возбуждения берут из сети незначительную мощность для питания обмоток возбуждения. То же относится и к двигателям смешанного возбуждения, тормозящимся на одном потоке параллельной обмотки.

Двигатели последовательного и смешанного возбуждения с подпиткой последовательной обмотки при динамическом торможении берут из сети мощность для питания обмоток, соответствующую номинальному току.

В заключение отметим области применения обоих видов торможения.

Противовключение обычно применяется для реверсивных приводов, в которых замедление служит для немедленного изменения направления хода или для быстрой неавтоматической остановки. Противовключение, например, применяется для приводов хода моста и тележки кранов, для подвижных составов и для других разных средств передвижения.

Динамическое торможение обычно применяется для неревверсивных приводов. Оно применяется и для реверсивных, требующих автоматической остановки в определенных положениях. Динамическое торможение применяется для вращающихся распределителей и лебедок конусов доменных печей, для подъемно-качающихся столов, летучих ножниц, кантователей, сбрасывателей и других механизмов в прокатных цехах.

2-25. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Регулирование частоты вращения двигателей смешанного возбуждения может производиться теми же способами, что и двигателей последовательного возбуждения, т. е. изменением сопротивления последовательного резистора в силовой цепи якоря и сопротивления резистора, шунтирующего якорь. Кроме того, в § 2-21 был рассмотрен еще один способ регулирования частоты вращения двигателя смешанного возбуждения — закорачивание накоротко последовательной обмотки возбуждения.

Способы расчета регулировочных механических характеристик, приведенные в § 2-17 для двигателей последовательного возбуждения, справедливы в полной мере и для двигателей смешанного возбуждения.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Из всех видов двигателей асинхронные двигатели получили наиболее широкое распространение в промышленности и продолжают вытеснять все больше и больше двигатели постоянного тока. Уже в настоящее время преобладающее количество мостовых кранов оборудуется асинхронными двигателями; большинство механизмов станков, вспомогательных механизмов прокатных станов и механизмов дру-

гих отраслей промышленности оборудуется также асинхронными двигателями. Наконец, асинхронные двигатели монополюсно применяются для таких широко распространенных приводов, как транспортеры, небольшие вентиляторы, насосы.

Асинхронные двигатели уступают место двигателям постоянного тока, питаемым от сети или по системе преобразователь — двигатель, лишь в приводах, требующих плавного регулирования частоты вращения (строгальные станки, правильные машины, регулируемые главные приводы прокатных станов и т. п.), в электрическом транспорте и в приводах большой мощности повторно-кратковременного режима (реверсивные станы).

В мощных нерегулируемых установках длительного режима (двигатель-генераторы, компрессоры, насосы и т. п.) серьезным конкурентом асинхронных двигателей стал синхронный двигатель. Асинхронные двигатели получили широкое распространение благодаря следующим своим качествам: дешевизне двигателя, простоте конструкции, надежности, высокому к. п. д. и дешевизне преобразовательной установки в виде трансформатора по сравнению с двигатель-генераторами или тиристорными преобразователями, требуемыми для двигателей постоянного тока.

Внедрение в промышленность статических регулируемых преобразователей частоты позволит еще шире применять асинхронные и синхронные двигатели. Недостатками асинхронных двигателей являются: 1) квадратичная зависимость момента от напряжения; при падении напряжения в сети сильно уменьшаются пусковой и критический моменты; 2) опасность перегрева статора, особенно при повышении напряжения сети, и ротора при понижении напряжения; 3) малый воздушный зазор, несколько понижающий надежность двигателя.

3-1. НОМИНАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Для систематизации и обобщения расчетов, а также для облегчения ориентации в расчетах вводится понятие номинального сопротивления ротора.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором номинальным сопротивлением ротора называется также активное сопротивление каждой цепи ротора, состоящее из внутреннего и внешнего сопротивлений, которое при неподвижном роторе и номинальных для статора частоте и

напряжении в сети определит номинальный ток в роторе. В качестве иллюстрации на рис. 3-1 показана схема включения в сеть асинхронного двигателя с обозначенными внутренним и внешним сопротивлениями, а также напряжениями и токами.

Цепями ротора будем называть его цепи между внутренней нулевой точкой соединенных в звезду фаз и нулевой точкой внешних сопротивлений. В случае соединения фаз ротора в треугольник будем понимать цепи как для эквивалентной звезды.

Для того чтобы при неподвижном роторе получить в его цепях номинальные токи $I_{р.н}$, каждая из них должна иметь сопротивление

$$R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{\sqrt{3} I_{р.н}}, \quad (3-1)$$

где $E_{р.н}$ — э. д. с. между кольцами неподвижного разомкнутого ротора.

Согласно рис. 3-1 нужно было бы в (3-1) писать не активное сопротивление цепи ротора $R_{р.н}$, а полное $z_{р.н}$, но ввиду того, что активное сопротивление роторных цепей асинхронных двигателей, состоящее из внутреннего и внешнего активного сопротивления, почти равно полному (кажущемуся), будем принимать в расчетах $R_{р.н}$ вместо $z_{р.н}$.

Для определения $R_{р.н}$ совершенно безразлично, как соединены обмотки ротора, в звезду или в треугольник. Формула (3-1) дает истинное сопротивление цепей ротора при соединении его фаз в звезду и эквивалентное, приведенное к звезде, в случае соединения фаз треугольником.

При определении $R_{р.н}$ асинхронного двигателя, исполненного для длительного режима работы, значение $I_{р.н}$ берется по каталогу соответственно длительному режиму. Если двигатель выполнен для повторно-кратковременной или кратковременной работы, то значение $I_{р.н}$ нужно брать по каталогу для ПВ=40 или 25% в зависимости от принятого заводом-изготовителем номинального повторно-кратковременного режима.

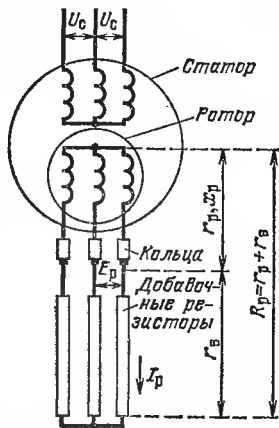


Рис. 3-1. Схема включения асинхронного двигателя с добавочными резисторами в роторе.

В расчетах с относительными значениями номинальное сопротивление ротора принимается за единицу.

Любое относительное сопротивление r найдется:

$$r_* = \frac{r}{R_{p.n}}. \quad (3-2)$$

Пример 3-1. Определить относительное сопротивление $r = 0,31$ Ом для двигателя типа МТ61-10, 30 кВт, 380 В, 574 об/мин, $E_{p.n} = 142$ В, $I_{p.n} = 133$ А.

Решение. Номинальное сопротивление ротора

$$R_{p.n} = \frac{E_{p.n}}{\sqrt{3} I_{p.n}} = \frac{142}{1,73 \cdot 133} = 0,62 \text{ Ом.}$$

Относительное сопротивление

$$r_* = \frac{r}{R_{p.n}} = \frac{0,31}{0,62} = 0,5.$$

3-2. ВНУТРЕННИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Рассмотрим отдельно цепи ротора и статора.

Ротор. Внутреннее сопротивление ротора складывается из следующих составляющих:

- $r_{ф.р}$ — активных сопротивлений фаз ротора;
- $x_{ф.р}$ — реактивных сопротивлений фаз ротора;
- $r_{щ}$ — сопротивлений щеток и колец ротора.

На рис. 3-2 показаны схемы включений ротора с подключенными добавочными резисторами. Добавочные резисторы всегда соединяются в звезду, между тем фазы ротора могут быть соединены или в звезду, или в треугольник. Для расчетов характеристик асинхронных двигателей и сопротивлений добавочных резисторов необходимо иметь для каждой

цепи ротора суммарные сопротивления из внутренних и внешних составляющих.

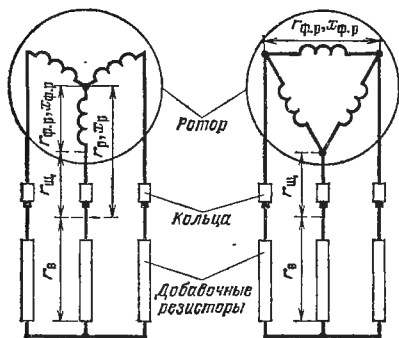


Рис. 3-2. Схемы соединений обмоток ротора в звезду и в треугольник с включенными добавочными резисторами.

В случае соединения фаз звездой внутренние сопротивления цепи ротора равны:

$$\left. \begin{aligned} r_p &= r_{\phi, p\Delta} + r_{ш}; \\ x_p &= x_{\phi, p\Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

Полное активное сопротивление цепи ротора R_p определится суммированием внутреннего r_p и внешнего $r_{в}$.

При соединении фаз ротора треугольником мы не можем применить такое простое суммирование. В этом случае нужно предварительно сопротивление фаз, соединенных треугольником, привести к эквивалентной звезде.

Исходя из условий получения равных моментов, приравняем электрические потери в фазах ротора для соединения их треугольником и эквивалентной звездой:

$$3I_{\phi, p\Delta}^2 r_{\phi, p\Delta} = 3I_{\phi, p\Delta}^2 r_{\phi, p\Delta}.$$

Ввиду того что

$$I_{\phi, p\Delta} = \frac{I_p}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad I_{\phi, p\Delta} = I_p,$$

получим после подстановки и преобразований:

$$r_{\phi, p\Delta} = \frac{1}{3} r_{\phi, p\Delta}, \quad (3-4)$$

т. е. эквивалентное активное сопротивление фазы ротора для соединения звездой в 3 раза меньше активного сопротивления фазы при соединении их треугольником.

Выясним, как по известному полному сопротивлению фазы ротора для соединения треугольником получить эквивалентное полное сопротивление фазы для соединения звездой:

$$\begin{aligned} z_{\phi, p\Delta} &= \frac{E_{\phi, p\Delta}}{I_{\phi, p\Delta}} = \frac{E_p}{I_p/\sqrt{3}}; \\ z_{\phi, p\Delta} &= \frac{E_{\phi, p\Delta}}{I_{\phi, p\Delta}} = \frac{E_p/\sqrt{3}}{I_p}, \end{aligned}$$

откуда

$$z_{\phi, p\Delta} = \frac{1}{3} z_{\phi, p\Delta}. \quad (3-5)$$

Выражая эти сопротивления через активные и реактивные сопротивления и используя ранее выведенное равенство (3-4), получаем то же соотношение и для реактивных сопротивлений:

$$x_{\phi, p\Delta} = \frac{1}{3} x_{\phi, p\Delta}. \quad (3-6)$$

Пользуясь выведенными соотношениями, можем написать выражения для эквивалентных внутренних сопротивлений линий ротора в случае соединения фаз треугольником:

$$\left. \begin{aligned} r_p &= \frac{1}{3} r_{\phi. \Delta} + r_{щ}; \\ x_p &= \frac{1}{3} x_{\phi. \Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

Сопротивление щетки и кольца $r_{щ}$, входящее в выражение для r_p , может быть приближенно принято из расчета падения напряжения в них около 1 В.

Заметим, что при больших расстояниях от двигателя к контактор-

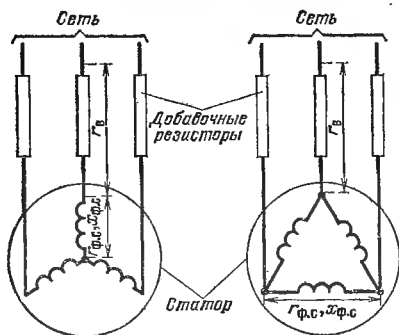


Рис. 3-3. Схемы соединений обмотки статора в звезду и в треугольник, включенных в сеть через добавочные резисторы.

ной панели необходимо учитывать еще сопротивление внешних проводов.

Статор. Как видно из рис. 3-3, внутренние сопротивления цепи статора состояются из:

$r_{\phi. c}$ — активных сопротивлений фаз статора;

$x_{\phi. c}$ — реактивных сопротивлений фаз статора.

В расчетах нас будут интересовать внутренние сопротивления цепей статора r_c и x_c , которые в случае соединения фаз звездой равны фазным:

$$\left. \begin{aligned} r_c &= r_{\phi. c \Delta}; \\ x_c &= x_{\phi. c \Delta}, \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

а в случае соединения фаз треугольником, так же как и для цепи ротора, втрое меньше фазных:

$$\left. \begin{aligned} r_c &= \frac{1}{3} r_{\phi. c \Delta}; \\ x_c &= \frac{1}{3} x_{\phi. c \Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

При включении асинхронного двигателя в сеть с замкнутыми кольцами (короткое замыкание) он ведет себя

так, как если бы цепи его имели активное и реактивное сопротивления, равные следующим значениям:

$$\left. \begin{aligned} r_k &\approx r_c + r'_p; \\ x_k &\approx x_c + x'_p, \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

где r_k и x_k — активное и реактивное сопротивления короткого замыкания (см. § 3-12); r'_p и x'_p — приведенные значения внутренних сопротивлений цепей ротора к статору.

Приведенные сопротивления ротора могут быть вычислены, если известен коэффициент трансформации сопротивлений:

$$\left. \begin{aligned} r'_p &= r_p k_r; \\ x'_p &= x_p k_r. \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

Коэффициент трансформации сопротивлений равен:

$$k_r = \frac{m_c}{m_p} \left(\frac{\omega_c}{\omega_p} \frac{k_c}{k_p} \right)^2 = \frac{m_c}{m_p} k_e^2,$$

где m_c , m_p — числа фаз статора и ротора; ω_c , ω_p — числа витков в одной фазе статора и ротора; k_c , k_p — обмоточные коэффициенты статора и ротора; k_e — коэффициент трансформации э. д. с., который можно приближенно определить, зная номинальное линейное напряжение статора $U_{c.n}$ и э. д. с. между кольцами неподвижного разомкнутого ротора $E_{p.n}$:

$$k_e = \frac{\omega_c}{\omega_p} \frac{k_c}{k_p} = \frac{E_c}{E_{p.n}} \approx 0,95 \frac{U_{c.n}}{E_{p.n}}.$$

Для короткозамкнутых асинхронных двигателей r_k и x_k можно определить приближенно, пользуясь значениями пускового тока и пускового коэффициента мощности.

Полное сопротивление короткого замыкания (т. е. при включении неподвижного двигателя) для соединения фаз в звезду

$$z_k = \frac{U_{c.n}}{\sqrt{3} I_{c.n}}, \quad (3-12)$$

а активное и реактивное сопротивления короткого замыкания определяются:

$$\left. \begin{aligned} r_k &= z_k \cos \varphi_n; \\ x_k &= \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3-13)$$

Для краново-металлургических двигателей типа МТК с короткозамкнутым ротором пусковые токи $I_{c.n} = (3,3 \div$

5,2)-кратные номинальному $\cos \varphi_n = 0,86 \div 0,6$ и соотношение между активным и реактивным сопротивлениями короткого замыкания:

$$x_k = (0,6 \div 1,3) r_k.$$

Для двигателей единой серии А с короткозамкнутым ротором с нормальным скольжением

$$\begin{aligned} I_{с.п} &= (4 \div 7) I_{с.н}; \\ \cos \varphi_n &= 0,7 \div 0,125; \\ x_k &= (1 \div 8) r_k. \end{aligned}$$

А. ДВИГАТЕЛИ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Асинхронные двигатели следует по возможности выбирать с короткозамкнутым ротором. Применение двигателей с фазным ротором должно быть в каждом случае обосновано.

Фазный ротор оправдывается в следующих основных случаях:

а) для мостовых кранов нормальных и быстроходных, где требуется регулирование скорости на приводах моста, тележки и подъема;

б) для маховиковых приводов с добавочным скольжением: ножницы, прессы, главные приводы прокатных станов и др.;

в) для приводов, например, в прокатных цехах, с большой частотой включений, при которой асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором не проходят по нагреву или не дают требуемых характеристик динамического торможения; в этих случаях часто дают удовлетворительные характеристики двигатели с фазным ротором, с небольшими постоянно включенными в роторе резисторами с сопротивлением 0,15—0,4 номинального. Получается как бы двигатель с короткозамкнутым ротором с повышенным скольжением, но с вынесенными электрическими потерями в роторе.

3-3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрим основные характеристики, показанные на рис. 3-4 как примерные для одного из исполнений асинхронных двигателей. Значение $n_* = 1$ соответствует син-

хронной частоте вращения двигателя, т. е. частоте вращения ротора, равной частоте вращения потока статора. При этом в роторе не наводится э. д. с., а потому ток в нем и момент на валу равны нулю. Между тем через обмотки статора протекает ток намагничивания (ток идеального холостого хода), который обозначим $I_{с.х}$.

Этот ток создаст такой магнитный поток в статоре, который индуцирует обратную э. д. с., уравнивающую почти полностью приложенное внешнее напряжение.

У асинхронных двигателей, рассчитанных для длительного режима работы, воздушный зазор между статором и ротором выполняется очень малым (доли миллиметра). Поэтому ток статора холостого хода у этих двигателей сравнительно мал и составляет небольшую часть от номинального тока статора, а именно:

$$I_{с.х} \approx (0,2 \div 0,4) I_{с.н.}$$

У двигателей краново-металлургических типа МТ, рассчитанных для повторно-кратковременного режима работы с частыми пусками и ударной нагрузкой, воздушный зазор выполняется (из условий надежности) больше. Поэтому ток статора холостого хода получается большим и составляет:

$$I_{с.х} \approx (0,6 \div 0,75) I_{с.н.}$$

Столь большие токи статора холостого хода допустимы только при повторно-кратковременном режиме работы двигателей и неприемлемы для длительного режима работы, так как эти реактивные токи вызывают нагрев обмоток статора и понижают коэффициент мощности сети, особенно при малых нагрузках.

С уменьшением частоты вращения момент вначале растет приблизительно по прямолинейному закону, затем его рост немного замедляется, он достигает своего максимума и круто падает.

Увеличение статического момента, хотя бы незначительно, выше максимального момента M_m вызывает остановку двигателя. Принято соответствующее M_m скольжение называть критическим скольжением s_k .

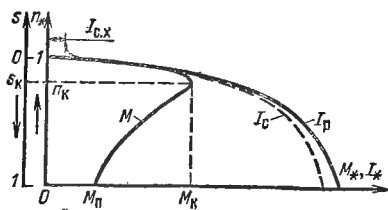


Рис. 3-4. Примерные естественные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

Для большинства обычных промышленных исполнений двигателей $M_m = 1,5 \div 3,5$, а s_k лежит в пределах $0,08—0,3$.

При снижении частоты вращения, считая от синхронной, ток ротора вначале изменяется одинаково с моментом — по прямолинейному закону и около критической частоты вращения расходится с ним, увеличиваясь далее, но уже не так быстро. Изменение тока статора от частоты вращения показано пунктиром.

Из приведенных характеристик мы видим, что при пуске асинхронного двигателя с закороченными кольцами момент получается небольшим, он составляет всего $0,5—1,5$ номинального момента, между тем токи ротора и статора чрезмерно велики. В зависимости от исполнения двигателя пусковые токи ротора и статора могут быть в $5—10$ раз больше номинальных.

Малые пусковые моменты могут быть недостаточными для трогания привода с места и ускорения; с другой стороны, большие токи статора и ротора резко ограничивают допустимую частоту пусков двигателей. Ниже будут рассмотрены средства для уменьшения чрезмерных пусковых токов асинхронных двигателей и одновременного увеличения пускового момента.

Перейдем к способам расчета и построения естественной механической характеристики, при этом будем пользоваться не частотами вращения, а скольжениями, дающими более простые зависимости.

Точный способ. Формула, связывающая моменты и скольжения асинхронных двигателей, имеет вид (по Клоссу):

$$M = M_m \frac{2+q}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q}, \quad (3-14)$$

в которой

$$s_k = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_p)^2}}; \quad (3-15)$$

$$q = \frac{r_c}{r'_p} 2s_k, \quad (3-16)$$

где M , M_m — моменты двигателя текущий и максимальный; s , s_k — скольжения ротора текущее и критическое; r_c , x_c — внутренние активное и реактивное сопротивления статора; r'_p , x'_p — внутренние активное и реактивное сопротивления цепи ротора, приведенные к статору.

Или, выражая s_k через сопротивление обмоток двигателя с помощью (3-15), получаем параметр:

$$q = \frac{2r_c}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_p)^2}}. \quad (3-17)$$

Для двигателей больших и средних мощностей, рассчитанных для длительного режима работы,

$$q \approx 0,1 \div 0,2.$$

Для двигателей краново-металлургических повторно-кратковременного режима типа МТ мощностью 2,2—125 кВт, имеющих повышенное скольжение,

$$q \approx 1,0 \div 0,2. \quad (3-18)$$

Подставив в (3-14) известный максимальный момент M_m и найденные по (3-15) и (3-16) критическое скольжение s_k и параметр q , можем, задаваясь различными значениями скольжения s , определить соответствующие значения момента M .

Приведенная формула (3-14), связывающая момент асинхронного двигателя со скольжением, хотя и носит название «точная», основана на ряде следующих допущений:

1. Электродвижущие силы, токи и магнитные потоки двигателя изменяются синусоидально во времени.

2. Магнитное поле в пространстве, т. е. в воздушном зазоре и стали статора и ротора, распределяется синусоидально.

3. Обмотки статора и ротора симметричны и воздушный зазор по окружности ротора равномерный, благодаря чему явления во всех трех фазах протекают одинаково.

4. Гистерезис и вихревые токи в роторной стали отсутствуют:

5. Отсутствуют механические потери в двигателе (трение в подшипниках, вентиляционные потери) и потому момент на валу двигателя равен электромагнитному моменту.

6. Реактивные сопротивления статора и ротора не меняются с изменением насыщения двигателя.

Все приведенные допущения вносят некоторую ошибку. Часть из них определяется качеством питающей системы, часть — точностью изготовления двигателей, т. е. случайными причинами. Рассчитанные по приведенным выше формулам характеристики двигателей близки к опытным и являются удовлетворительными для практических целей.

Приближенные способы. У двигателей средних и малых мощностей, имеющих нормальное скольжение (т. е. не повышенное скольжение), обычно активное сопротивление статора близко к активному приведенному сопротивлению ротора, т. е.

$$r_c \approx r'_p. \quad (3-19)$$

Поэтому для этих двигателей по (3-16) получим:

$$q = 2s_k, \quad (3-20)$$

и формула, связывающая момент со скольжением, примет простой вид:

$$M = M_m \frac{2 + 2s_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2s_k}. \quad (3-21)$$

Для крупных асинхронных двигателей можно пренебречь внутренним активным сопротивлением линии статора r_c , тогда $q = 0$ и формула момента обратится в популярную формулу:

$$M = M_m \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (3-22)$$

В тех случаях, когда неизвестны максимальный момент и критическое скольжение и возможно довольствоваться приближенными расчетами, следует принять естественную механическую характеристику асинхронного двигателя прямолинейной, проходящей через две известные точки: синхронной частоты вращения ($M = 0$, $s = 0$) и номинального скольжения ($M = M_n$, $s = s_n$). Формула для такой характеристики получит вид:

$$M = M_n \frac{s}{s_n}. \quad (3-23)$$

2. ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Формулы для искусственных характеристик отличаются от естественных тем, что вместо внутреннего сопротивления цепи ротора вводится полное активное, представляющее собой сумму сопротивлений ротора и добавочного резистора:

$$R_p = r_p + r_v.$$

Точный способ. В (3-14) при наличии добавочных резисторов в цепях ротора M_k останется тем же, что и с закорот-

ченными кольцами; q , как следует из (3-17), также не зависит от активного сопротивления цепей ротора. Рассмотрим, как зависит от активного сопротивления цепей ротора критическое скольжение $s_{к.}$.

Если для естественной характеристики по равенству (3-15)

$$s_{к. е} = \frac{r_p''}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x_p')^2}},$$

то для искусственных характеристик

$$s_{к. и} = \frac{R_p'}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x_p')^2}}.$$

Делением находим:

$$\frac{s_{к. и}}{s_{к. е}} = \frac{R_p}{r_p}, \quad (3-24)$$

т. е. критическое скольжение искусственной характеристики во столько раз больше естественного, во сколько полное активное сопротивление цепи ротора, включая добавочный резистор, больше сопротивления ротора.

Подставляя в (3-14) критическое скольжение, найденное по (3-24) для заданного сопротивления добавочного резистора в цепи ротора, и значение q то же, что и для естественной характеристики, нетрудно рассчитать и построить соответствующую искусственную характеристику.

Имея построенную естественную характеристику, можно еще проще построить искусственную для любого заданного сопротивления добавочного резистора в роторе, не производя расчетов по формуле. Действительно, обращаясь к (3-14) и считая M_m и q для данного двигателя постоянными, находим, что одинаковые моменты двигателя для естественной и искусственной характеристик могут быть только, если

$$\frac{s_e}{s_{к. е}} = \frac{s_{и}}{s_{к. и}}.$$

На основании равенства (3-24) получим:

$$\frac{s_{и}}{s_e} = \frac{R_p}{r_p}, \quad (3-25)$$

т. е. при любых одинаковых моментах для искусственной и естественной характеристик асинхронного двигателя скольжение на искусственной характеристике во столько раз больше, чем на естественной, во сколько полное активное

сопротивление линии ротора больше внутреннего активного сопротивления двигателя.

Приближенные способы. Из (3-15) следует, что при наличии добавочного резистора в роторе критическое скольжение равно (считаем $r_c = 0$):

$$s_k = \frac{R_p}{x_c + x'_p}. \quad (3-26)$$

Подставим (3-26) в (3-22), в которой для рабочей части характеристики пренебрежем дробью s/s_k по сравнению s_k/s :

$$M = 2M_m \frac{x_c + x'_p}{R'_p} s. \quad (3-27)$$

Поскольку приведенное значение сопротивления ротора R'_p к статору отличается от действительного R_p постоянным коэффициентом, можем, объединив все постоянные для данного двигателя величины в равенстве (3-27), переписать его:

$$M = C \frac{s}{R_p}. \quad (3-28)$$

Из этого равенства следует, что искусственные механические характеристики асинхронного двигателя при любых сопротивлениях добавочного резистора в роторе прямолинейны, все пересекаются в одной точке ($M = 0$, $s = 0$) и тем круче, чем больше сопротивление добавочного резистора.

Для того чтобы по данному сопротивлению добавочного резистора можно было построить искусственную характеристику или, наоборот, по построенной искусственной характеристике определить сопротивление добавочного резистора, которому она соответствует, найдем зависимость между скольжением и сопротивлением цепей ротора при постоянном моменте.

Если ротор неподвижен ($s = 1$) и сопротивление каждой цепи ротора равно номинальному ($r_p + r_v = R_{p.n}$), то двигатель разовьет номинальный момент M_n . Подставляя эти частные значения в (3-28), получаем:

$$M_n = C \frac{1}{R_{p.n}}. \quad (3-29)$$

В (3-28) и (3-29) выразим как явные функции R_p и $R_{p.n}$ и разделим одно на другое:

$$\frac{R_p}{R_{p.n}} = \frac{M_n}{M} s.$$

При номинальном моменте двигателя имеем:

$$s = R_{p*}, \quad (3-30)$$

т. е. при номинальном моменте асинхронного двигателя скольжения равны относительным значениям полного активного сопротивления цепи ротора.

Как следствие из (3-30) вытекает:

$$\text{при } M_* = 1 \quad \Delta s = \Delta r_{в*}, \quad (3-31)$$

т. е. при номинальном моменте асинхронного двигателя изменение скольжения равно изменению сопротивления добавочного резистора, выраженного в относительных значениях.

Таким образом, мы получили для асинхронного двигателя такие же зависимости между скольжением и сопротивлением, как и для двигателя параллельного возбуждения постоянного тока.

Пользуясь (3-30), можно для любого заданного сопротивления добавочного резистора построить соответствующую искусственную характеристику, определив точку ее при $M_* = 1$ и проводя через нее прямолинейный луч из точки синхронной частоты вращения. И обратно: по любой построенной искусственной характеристике можно определить, какому сопротивлению добавочного резистора в каждой цепи ротора она соответствует.

Из (3-30) следует:

$$\text{при } M_* = 1 \quad s_H = r_{p*}, \quad (3-32)$$

т. е. при номинальном моменте асинхронного двигателя с замкнутыми кольцами скольжение равно относительным значениям внутреннего активного сопротивления.

Пример 3-2. Для асинхронного двигателя типа АТ17Б7-10, $P_H = 850$ кВт, $U_{с.н} = 6000$ В, $n_c = 600$ об/мин рассчитать и построить естественную и искусственную характеристики при сопротивлениях резисторов в цепях ротора $r_B = 0,175$ Ом. Известно:

$$\begin{aligned} E_{p.н} &= 1150 \text{ В}; & r_c &= 0,6 \text{ Ом}; & r_p &= 0,025 \text{ Ом}; \\ I_{p.н} &= 450 \text{ А}; & x_c &= 4,17 \text{ Ом}; & r'_p &= 0,69 \text{ Ом}; \\ I_{с.х} &= 27,8 \text{ А}; & & & x'_p &= 4,15 \text{ Ом}. \\ s_H &= 0,0174; \\ M_{м*} &= 2,15; \end{aligned}$$

Фазы статора и ротора соединены в звезду.

Решение. Проведем расчет при помощи точных и приближенных формул, при этом для лучшего сравнения результатов будем считать известными, кроме номинальной мощности и частоты вращения, для точного способа

$$r_c, x_c, r_p, r'_p, x'_p, M_{м*}.$$

Для приближенного способа будем считать известными только обычные каталожные данные

$$E_{p.n}, I_{p.n}, s_n, M_{m*}$$

и для приближенного способа, основанного на прямолинейности механических характеристик, всего лишь

$$E_{p.n}, I_{p.n}, s_n.$$

1. Точный способ — формула (3-14).

а) Естественная характеристика. Определим постоянные величины s_k и q . Согласно (3-15) имеем:

$$s_{k.e} = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_p)^2}} = \frac{0,69}{\sqrt{0,60^2 + (4,17 + 4,15)^2}} = 0,083.$$

Параметр q определится по (3-16):

$$q = \frac{r_c}{r'_p} 2s_k = \frac{0,60}{0,69} \cdot 2 \cdot 0,083 = 0,144.$$

Подставив в (3-14) известные M_{m*} , $s_{k.e}$ и q , получим:

$$M_* = 2,15 \frac{2 + 0,144}{\frac{s}{0,083} + \frac{0,083}{s} + 0,144} = \frac{4,6}{\frac{s}{0,083} + \frac{0,083}{s} + 0,144}.$$

Задаваясь различными значениями s , находим соответствующие значения M_* , а затем по точкам строим на рис. 3-5 естественную механическую характеристику $1e$.

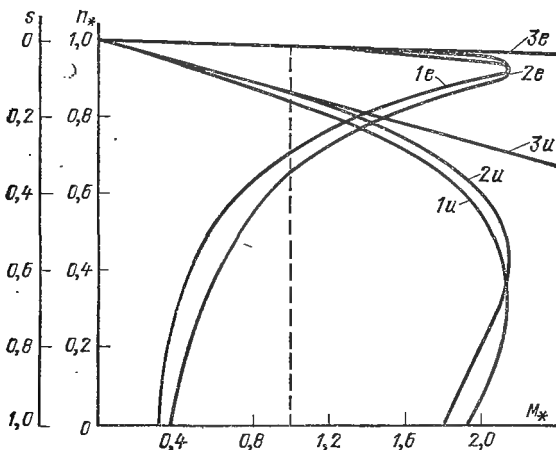


Рис. 3-5. Механические естественные и искусственные характеристики.

$1e$, $1u$ — рассчитанные по (3-14); $2e$, $2u$ — рассчитанные по (3-22); $3e$, $3u$ — рассчитанные по (3-23), т. е. построенные прямолинейными по двум точкам.

б) Искусственная характеристика при $r_B = 0,175$ Ом. По (3-25) находим:

$$\frac{s_H}{s_e} = \frac{R_p}{r_p} = \frac{r_p + r_B}{r_p} = \frac{0,025 + 0,175}{0,025} = 8,$$

т. е. скольжения на искусственной характеристике $1u$ должны быть в 8 раз больше, чем на естественной $1e$.

2. Приближенный способ — формула (3-22).

Найдем $s_{к.е}$ подстановкой в (3-22) известных $s_H = 0,0174$ и $M_* = 2,15$:

$$1 = 2,15 \frac{2}{\frac{0,0174}{s_{к.е}} + \frac{s_{к.е}}{0,0174}},$$

откуда получим $s_{к.е} = 0,0707$.

Зависимость момента от скольжения получится:

$$M_* = 2,15 \frac{2}{\frac{s}{0,0707} + \frac{0,0707}{s}}.$$

На основании этой зависимости на рис. 3-5 построена естественная характеристика $2e$.

Для построения искусственной характеристики воспользуемся (3-25), но в относительных значениях, т. е.

$$\frac{s_H}{s_e} = \frac{R_{p*}}{r_{p*}}.$$

Здесь $r_{p*} = s_H = 0,0174$.

Номинальное сопротивление

$$R_{p.н} = \frac{E_{p.н}}{\sqrt{3} I_{p.н}} = \frac{1150}{\sqrt{3} \cdot 450} = 1,475 \text{ Ом};$$

$$R_{p*} = r_{p*} + r_{в*} = r_{p*} + \frac{r_B}{R_{p.н}} = 0,0174 + \frac{0,175}{1,475} = 0,136.$$

Подстановкой получим:

$$\frac{s_H}{s_e} = \frac{0,136}{0,0174} = 7,82.$$

Умножением скольжений по характеристике $2e$ на 7,82 получим искусственную характеристику $2u$.

3. Приближенный способ — формула (3-23).

Строим естественную характеристику $3e$ при помощи линейки, проводя луч из точки синхронной частоты вращения ($M = 0, n_* = 1$) через точку, соответствующую номинальному скольжению ($M_* = 1, s_H = 0,0174$). Строим искусственную характеристику $3u$, проводя луч опять из точки синхронной частоты вращения через точку ($M_* = 1, s = R_{p*} = 0,136$).

Расчет по (3-14) требует много данных, не приводимых в каталогах; он кропотлив и может быть оправдан в отдельных случаях.

Для практических расчетов можно пользоваться приближенной формулой (3-22), основанной на каталожных исходных данных и обеспечивающей, как видно из рис. 3-5, удовлетворительную точность в рабочей части характеристик.

Способ построения механических характеристик при помощи (3-23), основанный на прямолинейности механических характеристик, является простейшим, но и наименее точным. Этим способом можно пользоваться для рабочей части характеристик с моментом примерно до 0,7 критического момента, если нет данных для более точных расчетов и приближенные расчеты для конкретных условий допустимы.

3. СЕМЕЙСТВА ИСКУССТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для получения требуемых механических характеристик и расчетов сопротивлений удобно пользоваться заранее построенными семействами характеристик. Поскольку эти семейства характеристик предназначаются для многократного пользования, желательно рассчитывать их по точным формулам.

На рис. 3-6 дано семейство механических характеристик для асинхронного двигателя с фазным ротором с максимальным моментом $M_{м*} = 3$. Только одна из характеристик рассчитана по (3-14), а остальные, соответствующие разным полным сопротивлениям ротора $R_{р*} = r_{р*} + r_{в*}$, найдены при помощи простого отношения скольжений по формуле (3-25).

Характеристики рис. 3-6 рассчитаны для двигателя МТ-52-8, 30 кВт, 380 В, 725 об/мин, $E_{р.н} = 257$ В, $I_{р.н} = 74,3$ А, $r_p = 0,0593$ Ом (см. приложение 8 в конце книги). Сопротивление линии ротора принято $r_{р*} = 0,033$ с учетом сопротивления щеток. Это сопротивление соответствует номинальному скольжению ротора. Семейство характеристик рис. 3-6 может быть использовано и для других двигателей, имеющих 3-кратный максимальный момент и параметр q , близкий к 0,5.

Рассчитаем и построим универсальные характеристики асинхронных двигателей, которые охватывали бы любые максимальные моменты M_m , любые критические скольжения s_k для практических значений параметра q от 0 до 1 (крайнее значение $q = 0$ принимаем только для оценки значимости параметра q).

Перепишем (3-14) в виде относительных значений M и s от M_m и s_k , т. е.

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2+q}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q} \quad (3-33)$$

Задаваясь различными значениями s/s_k при известном q , мы получаем значения для M/M_m .

На рис. 3-7 построены кривые $M/M_m = f(s/s_k)$ для трех значений параметра: $q = 0; 0,5; 1$. Эти кривые охватывают область двигательного режима при $\frac{s}{s_k} < \frac{1}{s_k}$ и две области генераторного режима: а) режим противовключения при

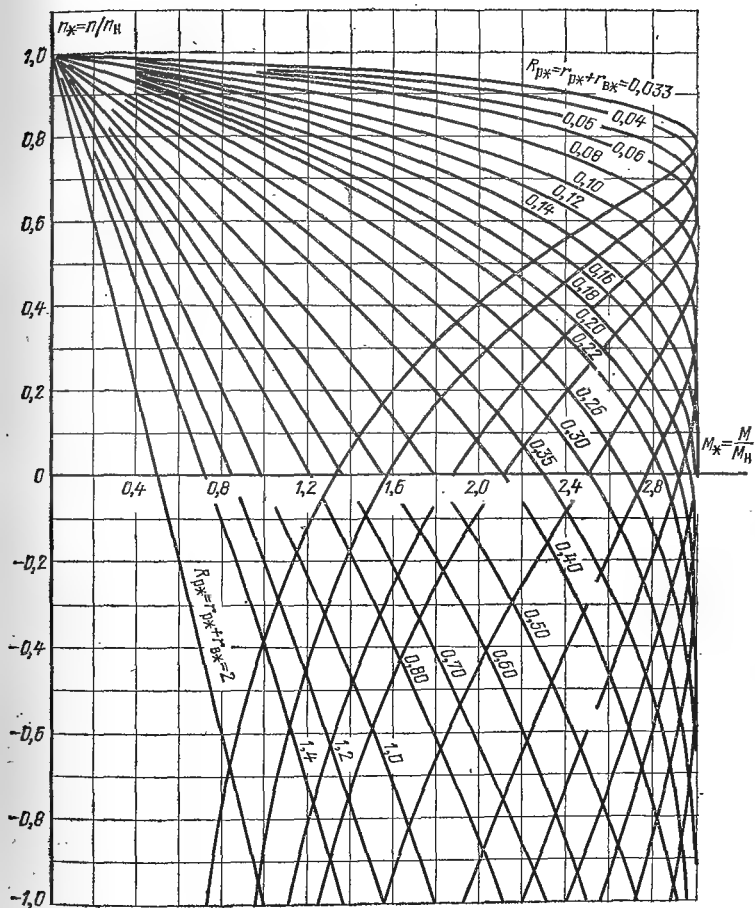


Рис. 3-6. Универсальные механические характеристики асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТ с 3-кратным максимальным моментом (рассчитаны по данным двигателя МТ-52-8, 30 кВт, 725 об/мин), $q = 0,46$.

$\frac{s}{s_K} > \frac{1}{s_K}$ и б) режим сверхсинхронной частоты вращения с рекуперацией энергии в сеть при отрицательных значениях $\frac{s}{s_K}$. Как видно из рис. 3-7, параметр q влияет не сильно в области положительных скольжений, но значительно при отрицательных. При положительных скольжениях максимальный момент равен максимальному моменту двигателя.

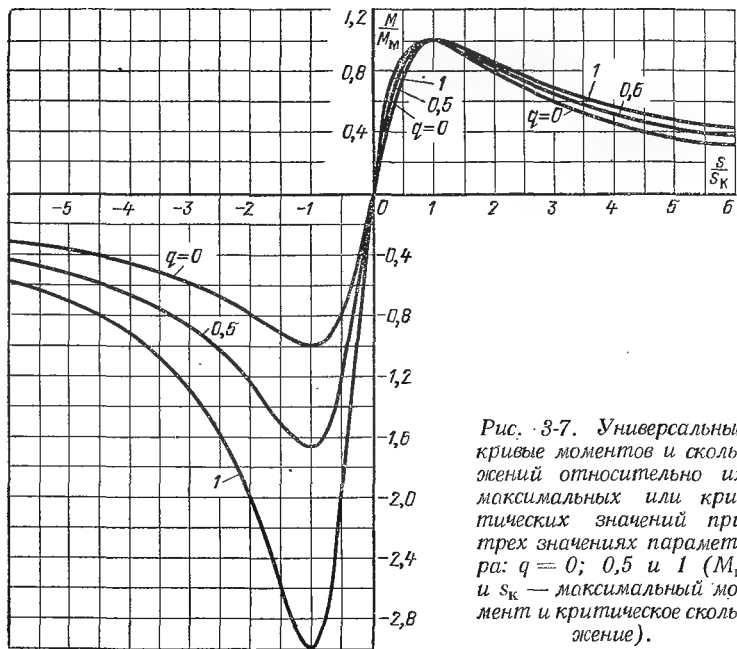


Рис. 3-7. Универсальные кривые моментов и скольжений относительно их максимальных или критических значений при трех значениях параметра: $q = 0$; $0,5$ и 1 (M_m и s_K — максимальный момент и критическое скольжение).

тельного режима при всех значениях q , тогда как при отрицательных скольжениях он выше максимального для двигательного режима ($\frac{s}{s_K} = 1$) и тем больше, чем больше параметр q . В частности, при $q = 0,5$ максимальный момент двигателя равен 1,6-кратному, а при $q = 1$ — 3-кратному максимального двигательного режима.

С помощью кривых рис. 3-7, а точнее, с помощью табл. 3-1 можно получить точки для построения механических характеристик двигателя $s = f(M)$, а именно:

$$s = \left(\frac{s}{s_K}\right) s_K; \quad M = \left(\frac{M}{M_m}\right) M_m.$$

Относительные значения частоты вращения и моменты найдутся:

$$n_* = 1 - s; \quad M_* = M/M_m. \quad (3-34)$$

Частоты вращения искусственных характеристик можно получить, если изменить скольжения в (3-34) пропорционально сопротивлениям цепей ротора согласно (3-25).

С помощью табл. 3-1 можно получить и обратную зависимость $\frac{s}{s_k} = f\left(\frac{M}{M_k}\right)$, если промежуточные значения относительных скольжений определять простой пропорцией, так как изменения на небольших интервалах, принятых в табл. 3-1, можно считать по прямолинейному закону.

В некоторых случаях может возникнуть желание иметь формулу для механической характеристики асинхронного двигателя со скольжением в функции момента. Эту формулу нетрудно получить из (3-14), где момент дан в функции скольжения. После преобразований получим:

$$\frac{s}{s_k} = A \pm \sqrt{A^2 - 1}, \quad \text{где } A = \frac{M_m}{M} \left(1 + \frac{q}{2}\right) - \frac{q}{2}.$$

Здесь перед корнем ставится знак минус при скольжениях, меньших критического, а плюс — при скольжениях, больших критического.

Ток ротора может быть определен из равенства, которое получается делением (3-37) на это же равенство, написанное для номинальных условий ($M_n, I_{p.n}, s_n$):

$$I_{p*} = \sqrt{M_* \frac{s}{s_n}}. \quad (3-35)$$

В тех случаях, когда пусковые резисторы удалены от двигателя, следует при расчетах пользоваться не естественной характеристикой, а более крутой, учитывая сопротивление внешних проводов.

Пример 3-3. Для двигателя типа МТ-71-10, 80 кВт, 582 об/мин определить критическое скольжение в двигательном режиме и кратность максимального момента к номинальному при сверхсинхронной частоте вращения.

Решение. Из таблицы в приложении 6 в конце книги для двигателя МТ-71-10 имеем: $M_m/M_n = 3,3$; $r_c = 0,0275$ Ом, $x_c = 0,113$ Ом, $r_p = 0,0266$ Ом, $x_p = 0,068$ Ом, $k_c = 1,21$, $E_{p.n} = 294$ В, $I_{p.n} = 167$ А.

Критическое скольжение естественной характеристики по (3-15):

$$s = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x'_p)^2}} = \frac{0,0389}{\sqrt{0,0275^2 + (0,113 + 0,0995)^2}} = \frac{0,0389}{0,0214} = 0,182.$$

Режим двигателя и противовключения

$+\frac{s}{s_K}$	$+\frac{M}{M_M}$										
	$q=0$	$q=0,1$	$q=0,2$	$q=0,3$	$q=0,4$	$q=0,5$	$q=0,6$	$q=0,7$	$q=0,8$	$q=0,9$	$q=1$
0,05	0,100	0,104	0,109	0,113	0,117	0,122	0,126	0,130	0,134	0,138	0,142
0,10	0,198	0,206	0,214	0,221	0,229	0,236	0,243	0,250	0,257	0,264	0,270
0,15	0,293	0,304	0,313	0,323	0,333	0,342	0,351	0,359	0,368	0,376	0,384
0,20	0,385	0,396	0,407	0,418	0,429	0,439	0,448	0,458	0,467	0,475	0,484
0,25	0,471	0,483	0,494	0,505	0,516	0,526	0,536	0,545	0,554	0,563	0,571
0,30	0,550	0,562	0,574	0,585	0,595	0,605	0,614	0,623	0,632	0,640	0,647
0,35	0,624	0,635	0,646	0,656	0,665	0,674	0,683	0,691	0,699	0,706	0,713
0,40	0,690	0,700	0,710	0,719	0,727	0,735	0,743	0,750	0,757	0,763	0,769
0,45	0,749	0,757	0,766	0,774	0,781	0,788	0,795	0,801	0,806	0,812	0,817
0,50	0,800	0,808	0,815	0,821	0,828	0,833	0,839	0,844	0,848	0,853	0,857
0,55	0,845	0,851	0,857	0,862	0,867	0,872	0,876	0,880	0,884	0,887	0,891
0,60	0,882	0,887	0,892	0,896	0,900	0,904	0,907	0,910	0,913	0,916	0,918
0,65	0,914	0,918	0,921	0,924	0,927	0,930	0,932	0,935	0,937	0,939	0,941
0,70	0,940	0,942	0,945	0,947	0,949	0,951	0,953	0,955	0,956	0,958	0,959
0,75	0,960	0,962	0,963	0,965	0,966	0,968	0,969	0,970	0,971	0,972	0,973
0,80	0,976	0,977	0,978	0,979	0,980	0,980	0,981	0,982	0,982	0,983	0,984
0,90	0,994	0,995	0,995	0,995	0,995	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,2	0,984	0,984	0,985	0,986	0,986	0,987	0,987	0,988	0,988	0,989	0,989
1,4	0,946	0,948	0,951	0,953	0,955	0,956	0,958	0,959	0,961	0,962	0,963
1,6	0,899	0,903	0,907	0,911	0,914	0,917	0,920	0,923	0,926	0,928	0,930
2	0,800	0,808	0,815	0,821	0,828	0,833	0,839	0,844	0,848	0,853	0,857
2,5	0,690	0,700	0,710	0,719	0,727	0,735	0,743	0,750	0,757	0,763	0,769
3	0,600	0,612	0,623	0,633	0,643	0,652	0,661	0,669	0,677	0,685	0,692
3,5	0,528	0,540	0,552	0,563	0,573	0,583	0,593	0,602	0,611	0,619	0,627
4	0,471	0,483	0,494	0,505	0,516	0,526	0,536	0,545	0,554	0,563	0,571
5	0,385	0,396	0,407	0,418	0,429	0,439	0,448	0,458	0,467	0,475	0,484
6	0,324	0,335	0,346	0,356	0,366	0,375	0,384	0,393	0,402	0,410	0,419
8	0,246	0,255	0,264	0,273	0,281	0,290	0,298	0,306	0,314	0,321	0,329
10	0,198	0,206	0,214	0,221	0,229	0,236	0,243	0,250	0,257	0,264	0,270

Здесь найдены по (3-11):

$$r_p = r_p k_r = r_p k_e^3 = 0,0266 \cdot 1,21^2 = 0,0389$$

$$x_p' = x_p k_r = x_p k_e^3 = 0,068 \cdot 1,21^2 = 0,0995.$$

Определим параметр q по (3-17):

$$q = \frac{2r_c}{\sqrt{r_c^2 + (x_c + x_p')^2}} = \frac{2 \cdot 0,0275}{0,214} \approx 0,25.$$

По табл. 3-1 в режиме сверхсинхронной частоты вращения для $\frac{s}{s_K} = 1$ ищем M/M_M при $q \approx 0,25$.

и q [см. формулу (3-14)]

Генераторный режим — сверхсинхронная частота вращения

$\frac{s}{s_K}$	$-\frac{M}{M_M}$ (здесь M_M взят из двигательного режима)										
	$q=0$	$q=0,1$	$q=0,2$	$q=0,3$	$q=0,4$	$q=0,5$	$q=0,6$	$q=0,7$	$q=0,8$	$q=0,9$	$q=1$
0,05	0,100	0,105	0,111	0,116	0,122	0,128	0,134	0,139	0,145	0,151	0,157
0,10	0,198	0,210	0,222	0,235	0,247	0,260	0,274	0,287	0,301	0,315	0,330
0,15	0,293	0,313	0,332	0,353	0,374	0,396	0,418	0,441	0,465	0,490	0,516
0,20	0,385	0,412	0,440	0,469	0,500	0,532	0,565	0,600	0,636	0,674	0,714
0,25	0,471	0,506	0,543	0,582	0,623	0,667	0,712	0,761	0,812	0,866	0,923
0,30	0,550	0,594	0,641	0,690	0,742	0,798	0,857	0,92	0,988	1,061	1,139
0,35	0,624	0,676	0,732	0,791	0,855	0,923	0,997	1,077	1,163	1,257	1,359
0,40	0,690	0,750	0,815	0,885	0,960	1,042	1,130	1,227	1,333	1,450	1,579
0,45	0,749	0,816	0,890	0,970	1,056	1,151	1,255	1,369	1,496	1,636	1,794
0,50	0,800	0,875	0,956	1,045	1,143	1,250	1,368	1,500	1,647	1,812	2,000
0,55	0,845	0,926	1,015	1,112	1,219	1,338	1,470	1,618	1,785	1,975	2,193
0,60	0,882	0,969	1,064	1,169	1,286	1,415	1,560	1,723	1,909	2,122	2,368
0,65	0,914	1,005	1,106	1,218	1,342	1,481	1,637	1,814	2,017	2,251	2,524
0,70	0,940	1,035	1,141	1,258	1,388	1,535	1,701	1,890	2,107	2,360	2,658
0,75	0,960	1,059	1,168	1,290	1,426	1,579	1,753	1,952	2,182	2,451	2,769
0,80	0,976	1,077	1,189	1,314	1,454	1,613	1,793	2,000	2,240	2,522	2,857
0,90	0,994	1,099	1,215	1,344	1,490	1,654	1,842	2,059	2,312	2,610	2,967
1	1	1,105	1,222	1,353	1,500	1,667	1,857	2,077	2,333	2,636	3,000
1,2	0,984	1,086	1,200	1,327	1,469	1,630	1,814	2,025	1,270	1,559	2,903
1,4	0,946	1,042	1,149	1,268	1,400	1,549	1,717	1,909	2,130	2,388	2,692
1,6	0,899	0,988	1,086	1,195	1,315	1,449	1,600	1,770	1,965	2,189	2,449
2	0,800	0,875	0,956	1,045	1,143	1,250	1,368	1,500	1,647	1,812	2,000
2,5	0,690	0,750	0,815	0,885	0,960	1,042	1,130	1,227	1,333	1,450	1,579
3	0,600	0,649	0,702	0,758	0,818	0,882	0,951	1,025	1,105	1,192	1,286
3,5	0,528	0,570	0,613	0,660	0,709	0,761	0,816	0,875	0,938	1,005	1,077
4	0,471	0,506	0,543	0,582	0,623	0,667	0,712	0,761	0,812	0,866	0,923
5	0,385	0,412	0,440	0,469	0,500	0,532	0,565	0,600	0,636	0,674	0,714
6	0,324	0,346	0,369	0,392	0,416	0,441	0,467	0,494	0,522	0,551	0,581
8	0,246	0,262	0,278	0,294	0,311	0,328	0,345	0,364	0,382	0,401	0,421
10	0,198	0,210	0,222	0,235	0,247	0,260	0,274	0,287	0,301	0,315	0,330

Принимаем в пределах $q = 0,2 \div 0,3$ среднее значение для

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1,222 + 1,353}{2} = 1,288,$$

откуда

$$M_* = M_{m*} \cdot 1,288 = 3,3 \cdot 1,288 = 4,25,$$

т. е. максимальный момент при сверхсинхронной частоте вращения равен 4,2 номинального, тогда как в двигательном режиме он равен 3,3 номинального.

Пример 3-4. Для двигателя типа МТ-71-10, 80 кВт, 582 об/мин по примеру 3-3 определить скольжение на естественной характеристике двигательного режима и относительный ток при 2-кратном моменте.

Решение. Момент, 2-кратный номинальному, составляет относительный момент от максимального:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{3,3} = 0,606.$$

Приближенно будем считать $q = 0,2$ вместо $q = 0,25$ по расчету в примере 3-3.

В столбце $q = 0,2$ находим два ближайших значения относительного момента: 0,574 и 0,646 соответственно при относительных скольжениях 0,30 и 0,35.

Добавка к $s/s_k = 0,30$ найдется пропорцией

$$\frac{x}{0,606 - 0,574} = \frac{0,35 - 0,30}{0,646 - 0,574},$$

откуда $x = 0,022$.

Поэтому при 2-кратном моменте $s/s_k = 0,30 + 0,022 = 0,322$.

Искомое скольжение получим:

$$s = s_k \cdot 0,322 = 0,182 \cdot 0,322 = 0,0585.$$

Относительный ток ротора найдем по (3-35):

$$I_{p*} = \sqrt{M_* \frac{s}{s_H}} = \sqrt{2 \frac{0,0585}{0,03}} = 1,97,$$

где номинальное скольжение

$$s_H = \frac{600 - 582}{600} = 0,03.$$

3-4. ПУСК С СИММЕТРИЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ СТУПЕНЕЙ РЕЗИСТОРА В РОТОРЕ

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ И РЕЖИМЫ ПУСКА

Момент асинхронного двигателя, Н·м, равен:

$$M = 0,71 m_c K_c \omega_c p \Phi I'_p \cos \varphi_p = C_m \Phi I_p \cos \varphi_p, \quad (3-36)$$

где m_c — число фаз статора (обычно $m_c = 3$); K_c — обмоточный коэффициент статора; ω_c — число витков в одной фазе статора; p — число пар полюсов статора; Φ — магнитный поток, входящий в ротор, Вб; I_p — ток фазы ротора, А; φ_p — угол сдвига между э. д. с. и током ротора.

Здесь магнитный поток Φ практически постоянен; при любых токах двигателя он индуцирует такую э. д. с. в статоре, которая уравнивает приложенное напряжение сети за вычетом (геометрическим) небольшого падения напряжения в обмотках статора. При пуске асинхронного двигателя с замкнутыми кольцами ток ротора I_p велик вследствие значительной э. д. с., индуцируемой в непод-

вижном роторе быстро вращающимся потоком статора, и малого активного сопротивления фаз закороченного ротора.

Пусковой коэффициент мощности $\cos \varphi_p$ мал настолько, что даже при большом токе ротора момент M двигателя получается сравнительно небольшим. Низкий $\cos \varphi_p$ объясняется большим сдвигом фаз φ_p между э. д. с. и током ротора из-за увеличенного реактивного сопротивления фаз ротора от повышенной частоты.

Как указывалось ранее (рис. 3-4), при пуске асинхронного двигателя с закороченными кольцами двигатель развивает момент 0,5—1,5 номинального и при этом ток статора и ротора больше номинального в 5—10 раз.

Такие большие токи в статоре и роторе недопустимы по условиям динамических усилий в обмотках и нагрева обмоток, а низкий пусковой момент обычно является недостаточным для привода.

Введение сопротивления пускового резистора в цепь ротора уменьшает пусковой ток и настолько увеличивает $\cos \varphi_p$, что пусковой момент возрастает. Кратности момента становятся почти равными кратностям тока. Но при очень больших сопротивлениях цепи ротора ток ротора сильно падает и пусковой момент опять уменьшается (см. рис. 3-6).

При ускорении двигателя падает э. д. с. ротора, вследствие чего падают ток ротора и момент. Для поддержания ускорения привода уменьшают по ступеням сопротивление пускового резистора, отчего при данной э. д. с. возрастают ток ротора и ускоряющий момент. Когда весь резистор будет закорочен, двигатель перейдет на свою естественную характеристику. Пусковые характеристики имеют вид, как показано на рис. 3-13.

Для дальнейших расчетов составим еще одно выражение для момента.

Пренебрегая потерями в стали ротора, можем написать, что мощность, передаваемая в ротор, равна электрическим потерям в роторе, т. е.

$$\frac{M n_c s}{9550} = \frac{3 I_p^2 R_p}{1000},$$

откуда

$$M = 28,6 \frac{I_p^2 R_p}{n_c s}, \quad (3-37)$$

где M — момент, Н·м; n_c — синхронная частота вращения, об/мин; I_p — ток цепи ротора, А; R_p — полное сопротивление цепи ротора, Ом; s — скольжение;

На рис. 3-8 показаны схемы включений ступеней пускового резистора в звезду, применяемые для двигателей малой, средней и большой мощности с роторным током до 900 А, а на рис. 3-37 — схема включений ступеней пускового

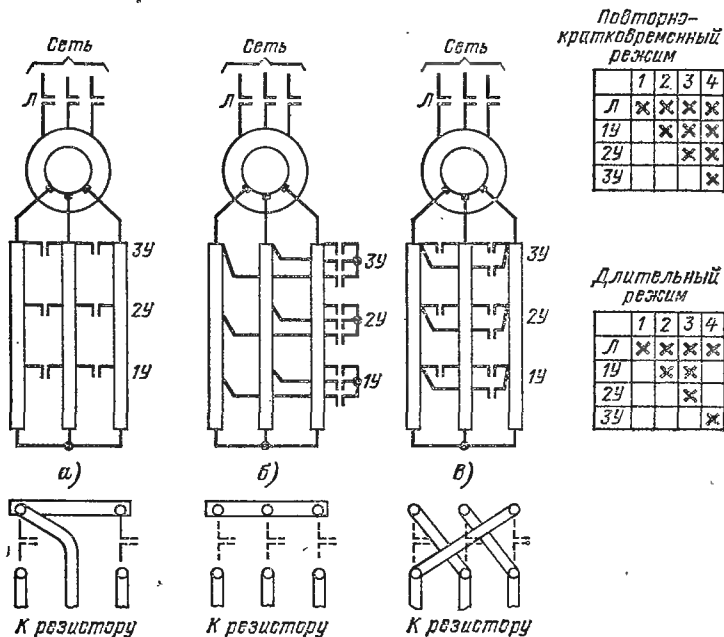


Рис. 3-8. Способы закорачивания ступеней пускового резистора для асинхронных двигателей.

резистора в двойную звезду, применяемая только для крупных двигателей с роторным током до 1800 А.

а) Схема рис. 3-8, а (ступени резистора соединены в звезду, контакторы — в неполную звезду). Этот способ имеет наиболее широкое распространение потому, что он требует минимальное количество контактов для закорачивания ступени и дает простое соединение силовых шин сзади панели (эскиз под схемой). Токи в контактах контактора равны токам в цепях ротора.

При управлении асинхронными двигателями от кулачковых контроллеров силового тока способ закорачивания ступеней обычно производится по данной схеме.

б) Схема рис. 3-8, б (ступени резистора соединены в звезду, контакторы — в полную звезду). Этот способ соединений даёт двойной разрыв между линиями. Он применяется очень редко — лишь для случаев сравнительно высоких напряжений в роторе. Схема соединений шин сзади панели получается очень простая.

Недостатком этой схемы по сравнению со схемой а является увеличенное число контактов — на одну пару для каждой ступени, что вызывает увеличение габаритов контакторной панели.

Простейшие реостаты, часто встречающиеся на практике, осуществляют закорачивание ступеней, как по схеме рис. 3-8, б.

в) Схема рис. 3-8, в (ступени резистора соединены в звезду, контакторы — в треугольник). При этом способе соединений получается для каждой ступени на один контакт больше, чем по схеме рис. 3-8, а; кроме того, соединение шин сзади панели получается сложнее. Однако при соединении контакторов в треугольник на них приходится меньший ток, чем по схемам рис. 3-8, а и б. Поэтому соединение треугольником используется, только если оно по сравнению со схемой неполной звезды даёт возможность применить контакторы меньшей величины.

Во всех приведенных схемах при длительном режиме работы двигателя контакторы 1У и 2У могут быть применены меньшей величины, чем контактор 3У.

Соединяя последний контактор ускорения (в приведенных схемах 3У) треугольником, а все остальное — звездой, часто удается обойтись одной, меньшей величиной контакторов в цепях ротора для всех ступеней.

г) Схема рис. 3-37 (соединение ступеней резистора в двойную звезду). Этот способ соединения, как уже было отмечено, применяется для крупных асинхронных двигателей. При этой схеме токи ротора разветвляются на две отдельные ступени резистора, благодаря чему имеется возможность применить все контакторы ускорения, кроме последних (4У, 5У) небольшой величины.

Вследствие того что для крупных двигателей обычно применяется большое число ступеней резистора, эффект от уменьшения величин контакторов ускорения получается весьма высоким.

В асинхронных двигателях могут получаться переходные режимы при подключении двигателя к сети или же при внезапном изменении сопротивления цепи статора или ротора, если до этого он был под напряжением.

Для облегчения анализа явлений в системах переменного тока при переходных режимах принято искусственно разбивать действительный неустановившийся ток $I_{\text{действ}}$ на два тока, одновременно действующих в одной цепи: установившийся $I_{\text{уст}}$ и уравнивающий $I_{\text{ур}}$.

Характер переходного режима зависит от значения установившегося тока в момент включения двигателя. Поскольку до включения двигателя в подводящих проводах тока нет, а есть только гармонически меняющееся напряжение, то, говоря о значении установившегося тока в момент включения двигателя, мы будем понимать то значение его, которое

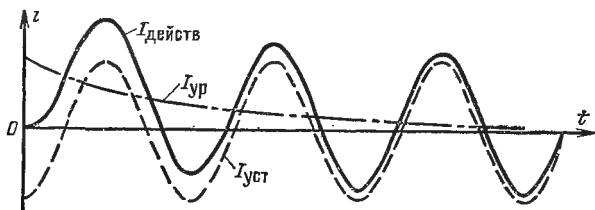


Рис. 3-9. Переходные явления тока при включении асинхронного двигателя в сеть в момент времени, когда установившийся ток имел бы амплитудное значение.

было бы в установившемся режиме при соответствующем значении напряжения сети и сдвиге фаз в этот момент.

При включении двигателя на сеть действительный ток всегда начинает свое изменение с нуля.

Если в момент включения двигателя установившийся ток не равен нулю, то мгновенно возникает равный ему и противоположно направленный уравнивающий ток, который аperiодически (не меняя направления) затухает.

Искажение установившегося тока тем больше, чем больше его начальное значение. Рисунок 3-9 показан для амплитудного значения установившегося тока в момент включения, при котором искажение получается наибольшим.

Если в момент включения двигателя установившийся ток равен нулю, то уравнивающий ток не возникает и сразу

же начинается установившийся режим. Уравнительные токи возникают в статоре и в роторе одновременно и не только при включении двигателя, но и при вращении его, когда в силовой цепи мгновенно изменяется сопротивление добавочного резистора. В обычных двигателях затухание уравнительного тока происходит быстро и значительно повышенный ток может получиться только в первых полупериодах.

В качестве иллюстрации на рис. 3-10 дана для асинхронного двигателя пусковая осциллограмма с неустановившимся режимом при включении его на сеть по схеме рис. 3-8.

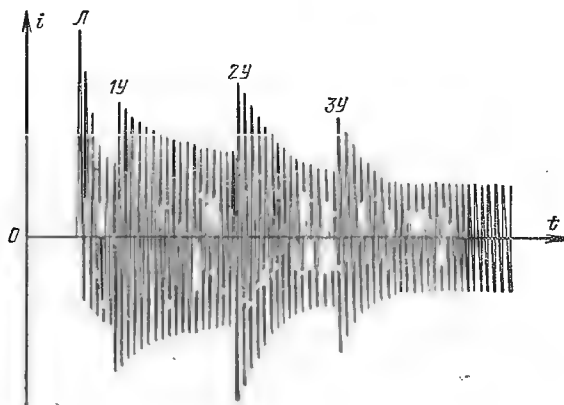


Рис. 3-10. Осциллограмма тока статора асинхронного двигателя при пуске.

Огибающая кривая токов осциллограммы дает изменение амплитуд тока. При расчете сопротивлений резисторов мы будем пользоваться действующими значениями токов, которые, как известно, меньше амплитудных в $\sqrt{2}$.

Рассмотренные выше неустановившиеся явления при включении двигателя на сеть и переключениях в его силовой цепи являются электромагнитными процессами, которые вызывают затухающие вибрации момента двигателя. Эти вибрации момента практически мало влияют на средние значения момента, а следовательно, и на частоту вращения двигателя, но иногда вызывают большие кратковременные усилия в звеньях механизма, чем понижают его надежность. Эти вопросы подробно исследовались В. А. Шубенко [Л. 23].

Условия для расчета сопротивлений пусковых резисторов, приведенные в § 2-4 для двигателя параллельного возбуждения постоянного тока, справедливы и для асинхронных двигателей с фазным ротором. Различие состоит лишь в том, что максимальные пики момента при форсированном режиме в двигателях постоянного тока ограничивались коммутацией, а в асинхронных двигателях они ограничиваются динамическими усилиями в обмотках и нагревом от

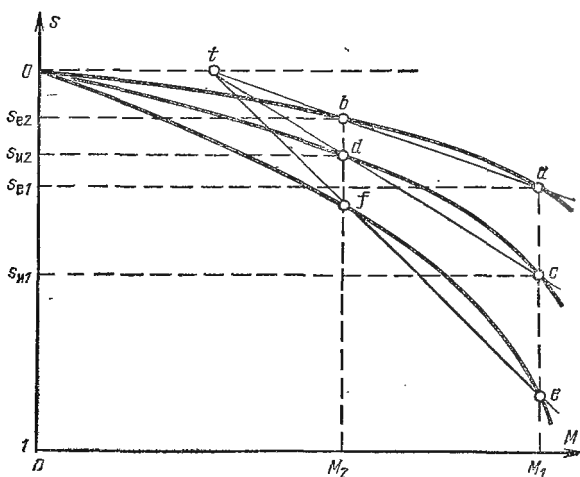


Рис. 3-11. Построение лучевой диаграммы для асинхронного двигателя.

увеличенных против момента токов в зоне критического скольжения и при более высоких скольжениях.

Максимальные пусковые пики моментов асинхронных двигателей желательно принимать не более 0,85 максимального момента, но в отдельных случаях можно принимать пики момента, равные максимальным, или же допускать пуск при скольжениях выше критического, например пуск с постоянно включенным резистором с небольшим сопротивлением $0,1R_{p.н}$ (рис. 3-6).

В зависимости от требуемой точности и от имеющихся данных для асинхронного двигателя расчет сопротивления пускового резистора может быть произведен точным или приближенным способом.

Точный способ. Представим себе естественные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором, как показано на рис. 3-11.

Если провести прямые через точки a и b , c и d , e и f , соответствующие одинаковым моментам M_1 и M_2 на естественной и искусственных характеристиках, то все они пересекутся в одной точке t на прямой $s = 0$. Докажем это.

Уравнение прямой ab :

$$\frac{s - s_{e1}}{s_{e2} - s_{e1}} = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1}. \quad (3-38)$$

Уравнение прямой cd :

$$\frac{s - s_{e1}}{s_{e2} - s_{e1}} = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1},$$

которое на основании соотношения (3-25) перепишется в виде

$$\frac{\frac{s}{(R_p/r_p)} - s_{e1}}{s_{e2} - s_{e1}} = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1}. \quad (3-39)$$

Точка пересечения прямых (3-38) и (3-39) характеризуется равенством текущих значений M и s , что, как видно из сравнения уравнений, возможно только в том случае, если $s = 0$.

На рис. 3-12 показано построение вспомогательных лучей для расчета сопротивления пускового резистора асинхронного двигателя с тремя ступенями.

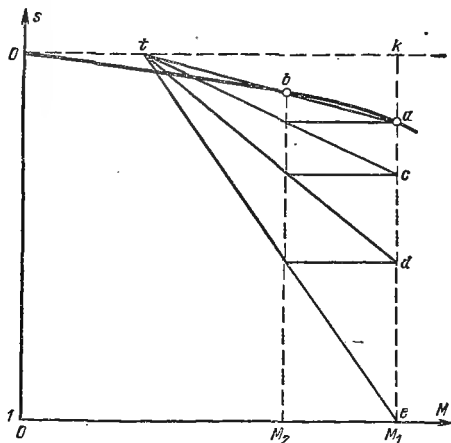


Рис. 3-12. Графический расчет сопротивления пускового резистора асинхронного двигателя при помощи точной естественной характеристики.

Вначале рассчитывается и строится естественная характеристика (можно при помощи табл. 3-1), затем в зависимости от требуемых пусковых условий задаются пиковыми (M_1) и переключающими (M_2) моментами; через полученные точки a и b строится первый луч до пересечения с прямой $s = 0$ в точке t ; далее строятся лучи с соблюдением равенства пиковых и переключающих моментов на всех ступенях. Если пики момента получаются неодинаковыми, то следует изменить M_1 или M_2 и снова построить лучи. Более высокая точность может быть получена, если пользоваться не естественной характеристикой, а определять для принятых моментов M_1 и M_2 соответствующие скольжения на естественной характеристике (точки a и b) по (3-33) или в табл. 3-1.

По построенным характеристикам определяют полные активные сопротивления линий ротора [см. выражение (3-25)]:

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= r_p \frac{kc}{ka}; \\ R_2 &= r_p \frac{kd}{ka}; \\ R_1 &= r_p \frac{ke}{ka}. \end{aligned} \right\} \quad (3-40)$$

Сопротивления ступеней при включении одинарной звездой:

$$\left. \begin{aligned} r_3 &= r_p \frac{ac}{ka}; \\ r_2 &= r_p \frac{cd}{ka}; \\ r_1 &= r_p \frac{de}{ka}. \end{aligned} \right\} \quad (3-41)$$

Следует особо обратить внимание, что при наличии семейств механических характеристик, как на рис. 3-6, наиболее простым и предпочтительным является способ расчета сопротивлений ступеней пускового резистора подбором подобно тому, как на рис. 2-46 для двигателей последовательного возбуждения постоянного тока.

Сопротивления ступеней при включении в двойную звезду определим согласно § 3-10, используя полные сопротивления цепей из (3-40).

Приближенный способ. Расчет сопротивлений ступеней пускового резистора для асинхронных двигателей с фаз-

ным ротором по приближенному способу основан на прямолинейности механических характеристик и аналогичен расчету для двигателей параллельного возбуждения постоянного тока (§ 2-4).

Этот способ можно применять при пиках момента, не превосходящих примерно 0,7 максимального.

В качестве примера рассмотрим схему силовой цепи асинхронного двигателя с тремя ступенями ускорения (рис. 3-13).

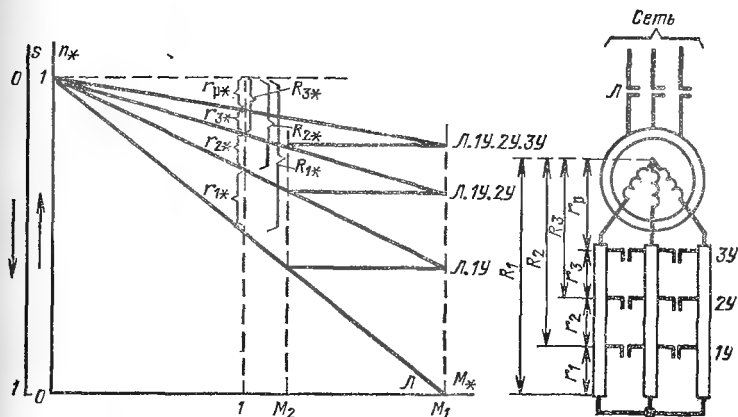


Рис. 3-13. Пусковые характеристики асинхронного двигателя, построенные приближенным способом.

а) Графический метод. В зависимости от требуемых условий для привода (§ 2-4) выбираются пиковые или переключающие моменты двигателя и для них строятся пусковые характеристики (рис. 3-13).

Отсчитывая при номинальном моменте скольжения для смежных характеристик, получаем в случае включения ступеней пускового резистора в одинарную звезду доли сопротивлений ступеней r_{1*} , r_{2*} , r_{3*} ..., по которым умножением на номинальное сопротивление находим абсолютные сопротивления ступеней.

Отсчитывая полные скольжения при номинальном моменте для искусственных характеристик, получаем соответствующие полные сопротивления линий ротора R_{1*} , R_{2*} , R_{3*} ..., необходимые для расчетов сопротивлений ступеней, включенных в двойную звезду (§ 3-10), или ступеней с несимметричными сопротивлениями (§ 3-13).

б) Аналитический метод. Число ступеней задано, режим пуска форсированный. Задаемся максимальными допускаемыми пиками моментов M_{1*} и определяем отношение пиков момента к моментам переключения (2-18):

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s_H M_{1*}}}. \quad (3-42)$$

Проверяем моменты переключения:

$M_{2*} = M_{1*}/\lambda$ должен быть больше $M_{с*}$.

Определяем сопротивления ступеней в случае включения их в одинарную звезду (2-16):

$$\left. \begin{aligned} r_3 &= r_p (\lambda - 1); \\ r_2 &= r_3 \lambda; \\ r_1 &= r_2 \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (3-43)$$

Полные активные сопротивления цепей ротора, необходимые для расчетов сопротивлений ступеней пускового резистора, включенных в двойную звезду или несимметрично, определяются по (2-15):

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= r_p \lambda; \\ R_2 &= R_3 \lambda; \\ R_1 &= R_2 \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (3-44)$$

Число ступеней задано, режим пуска нормальный. Задаемся переключающими моментами на 10—20% выше статического и находим отношение λ [см. (2-19)]:

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{s_H M_{2*}}}. \quad (3-45)$$

Проверяем пиковые моменты:

$M_{1*} = \lambda M_{2*}$ должен быть меньше допускаемого.

Определяем сопротивления ступеней или полные сопротивления цепей согласно (3-43) или (3-44).

Число ступеней неизвестно и его нужно определить. В зависимости от требуемого режима для привода задаемся пиковыми и переключающими моментами и по ним определяем число ступеней [формула (2-20)]:

$$m = \frac{\lg \frac{1}{s_H M_{1*}}}{\lg \frac{M_{1*}}{M_{2*}}}. \quad (3-46)$$

Если m получается дробным, изменяем M_{1*} или M_{2*} или оба так, чтобы значение m получалось целым числом.

Определяем λ как отношение M_{1*} к M_{2*} и по (3-43) или (3-44) находим соответственно или сопротивления ступеней, или полные сопротивления.

Приведенные формулы для асинхронного двигателя отличаются от аналогичных для двигателей параллельного возбуждения постоянного тока тем, что в них вместо внутреннего сопротивления двигателя $r_{д*}$ стоит номинальное скольжение s_n . Это вытекает из того положения (3-20), что при номинальном моменте скольжения равны относительно внутреннему сопротивлению цепи ротора.

Пример 3-4. Рассчитать сопротивления ступеней пускового резистора для асинхронного двигателя 380 В, 40 кВт, 900 об/мин, $E_{р.н} = 191$ В, $I_{р.н} = 126$ А, приводящего маховиковый штамповочный пресс. Для использования кинетической энергии маховика применена постоянно включенная секция резистора, определяющая скольжение $s_{п.с} = 0,1$ при номинальном моменте.

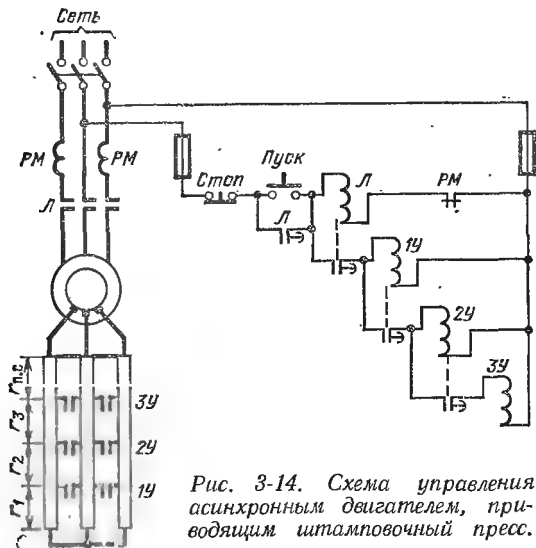


Рис. 3-14. Схема управления асинхронным двигателем, приводящим штамповочный пресс.

Двигатель включен в сеть длительно, вращая маховик и редуктор. Для срабатывания пресса нажимается кнопка, отчего контакторы включают соленоид, который сцепляет длительно вращающийся маховик с кривошипным валом пресса. Кривошип приходит во вращение, производит работу и, когда повернется на 360° , муфта автоматически расцепляется.

Двигатель управляется по схеме, показанной на рис. 3-14.

Решение. Двигатель всегда пускается вхолостую при расцепленной муфте, преодолевая только трение в редукторе. Ориентировочно можно полагать, что статический момент холостого хода составляет 0,1—0,2 номинального момента. Учитывая, что при пуске двигатель должен развернуть маховик, и не желая получить слишком большое время ускорения, которое может оказаться больше максимальной выдержки времени применяемых маятниковых реле, зададимся не переключающими, а пиковыми 1,5-кратными моментами.

Считая число ступеней $m = 3$ (рис. 3-14), пик момента $M_{1*} = 1,5$ и скольжение при номинальном моменте ввиду наличия постоянно включенной секции $s_{п.с} = 0,1$, по (3-42) определяем отношение пиковых моментов к переключающим:

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s_{п.с} \cdot M_{1*}}} = \sqrt[3]{\frac{1}{0,1 \cdot 1,5}} = 1,88.$$

Моменты переключения получим:

$$M_{2*} = M_{1*} / \lambda = 1,5 / 1,88 = 0,8,$$

т. е. значительно больше статического при пуске двигателя.

Сопротивление постоянно включенной секции резистора определится:

$$r_{п.с*} = s_{п.с} - s_n = 0,1 - \frac{1000 - 980}{1000} = 0,08$$

Сопротивления ступеней найдутся по (3-43), где вместо внутреннего активного сопротивления цепи ротора нужно подставлять полное активное сопротивление цепи ротора ($R_{п.с*} = r_{р*} + r_{п.с*} = s_{п.с} = 0,1$):

$$r_{3*} = R_{п.с*} (\lambda - 1) = 0,1 (1,88 - 1) = 0,088;$$

$$r_{2*} = r_{3*} \lambda = 0,088 \cdot 1,88 = 0,165;$$

$$r_{1*} = r_{2*} \lambda = 0,165 \cdot 1,88 = 0,31.$$

Определим сопротивления ступеней:

$$R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{\sqrt{3} I_{р.н}} = \frac{191}{1,73 \cdot 126} = 0,875 \text{ Ом};$$

$$r_{п.с} = r_{п.с*} R_{р.н} = 0,08 \cdot 0,875 = 0,070 \text{ Ом};$$

$$r_3 = r_{3*} R_{р.н} = 0,088 \cdot 0,875 = 0,077 \text{ Ом};$$

$$r_2 = r_{2*} R_{р.н} = 0,165 \cdot 0,875 = 0,144 \text{ Ом};$$

$$r_1 = r_{1*} R_{р.н} = 0,31 \cdot 0,875 = 0,271 \text{ Ом}.$$

5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РЕЗИСТОРАМИ В ЦЕПИ РОТОРА

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей резисторами в цепи ротора дает малоустойчивые частоты вращения, особенно при малых статических моментах и когда требуются низкие частоты вращения.

Этот способ применяют иногда для вентиляторов с небольшими пределами регулирования. Это неэкономичный способ, так как он вызывает потери, пропорциональные скольжению. Однако он немного экономичнее, чем способ регулирования с помощью муфт скольжения. При больших мощностях двигателей в настоящее время находят применение каскадные системы и недалеко то время, когда для всех мощностей двигателей будут применяться тиристорные преобразователи частоты.

Возвращаемся к вопросу регулирования частоты вращения резисторами в цепи ротора. Иногда удастся рассчитать сопротивления ступеней пускового резистора так, что они используются и для регулирования частоты вращения двигателя. В этих случаях расчет сопротивлений ступеней проще вести графическим способом. Покажем такой расчет сопротивлений ступеней на частном примере.

Пример 3-5. Рассчитать относительные сопротивления ступеней пускорегулирующего резистора для асинхронного двигателя 80 кВт, 380 В, 920 об/мин, приводящего вентилятор. По производственным

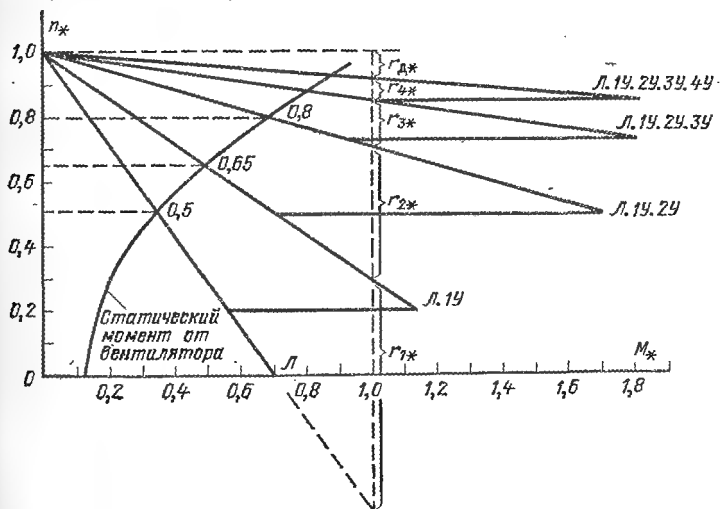


Рис. 3-15. Пускорегулирующие характеристики асинхронного двигателя, приводящего вентилятор.

условиям частота вращения вентилятора должна регулироваться и иметь следующие обязательные значения: 0,5; 0,65; 0,8 синхронной частоты вращения двигателя.

Характеристика изменения статического момента вентилятора в функции частоты вращения дана на рис. 3-15.

Решение. Откладывая на вертикали $M_* = 1$ скольжение

$$s_n = \frac{1000 - 920}{1000} = 0,08,$$

равное внутреннему сопротивлению фазы ротора двигателя $r_{д*} = 0,08$, находим номинальную частоту вращения (см. рис. 3-15) и, проведя через найденную точку луч из точки холостого хода, получим естественную характеристику двигателя.

Далее на характеристике статического момента вентилятора отмечаем точки, соответствующие требуемым частотам вращения 0,5; 0,65; 0,8, и через них проводим лучи, которые представляют собой требуемые характеристики двигателя из условий регулирования частоты вращения.

После указанных построений намечаем частоты вращения переключения двигателя с одной характеристики на другую, исходя из того, чтобы динамические моменты до переключения были достаточными и пики, моментов, а также изменения моментов не получались слишком большими.

Как видно из рис. 3-15, характеристики, построенные из условий регулирования частоты вращения, с успехом могут быть использованы как пусковые, однако для перехода на естественную характеристику необходимо ввести дополнительную характеристику, так как даже при переключении при моменте, равном статическому, пик момента получается чрезмерно большим.

Из построенных характеристик следует, что пускорегулирующий резистор должен иметь четыре ступени со следующими величинами сопротивлений:

$$r_{1*} = 0,72, \quad r_{2*} = 0,40, \quad r_{3*} = 0,13, \quad r_{4*} = 0,07.$$

Более точные результаты могут быть получены выбором характеристик из семейств характеристик, как показано на рис. 3-6, или построением естественной характеристики с помощью табл. 3-1 и искусственных характеристик по (3-25).

3-5. ПУСК С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ СТУПЕНЕЙ РЕЗИСТОРА В РОТОРЕ

Неравные сопротивления в линиях ротора порождают в них несимметричные токи, которые по известному правилу могут быть разложены на две симметричные составляющие системы с положительным и отрицательным порядком следования фаз. Токи положительного следования фаз создают вращающуюся по направлению вращения ротора прямую м. д. с., а токи отрицательного следования фаз создают вращающуюся против вращения ротора обратную м. д. с. Частоты вращения прямой и обратной м. д. с. относительно ротора соответственно равны:

$$n_c - n_p \quad \text{и} \quad -(n_c - n_p)$$

или в пространстве

$$\left. \begin{aligned} n_{пр} &= n_p + (n_c - n_p) = n_c; \\ n_{об} &= n_p - (n_c - n_p) = -n_c + 2n_p = -n_c(1 - 2s), \end{aligned} \right\} \quad (3-47)$$

где n_c — синхронная частота вращения; n_p — частота вращения ротора; $n_{пр}$ — частота вращения прямой м. д. с. в пространстве; $n_{об}$ — частота вращения обратной м. д. с. в пространстве.

Прямая м. д. с., как следует из (3-47), вращается в пространстве с синхронной частотой вращения в направлении вращения ротора и, будучи, таким образом, неподвижной относительно м. д. с. статора, создает равнодействующий поток и вращающий момент, как при равных сопротивлениях в цепях ротора.

Поток от обратной м. д. с., вращаясь относительно статора с указанной выше частотой вращения n_c (1—2 s), генерирует в нем э. д. с. частоты

$$f_{об} = f_c (1 - 2s), \quad (3-48)$$

где f_c — частота сети.

Наведенные э. д. с. в статоре создают в его обмотках токи частоты $f_{об}$, которые замыкаются через обмотки трансформаторов, генераторов, двигателей и других источников или приемников энергии, включенных в данную сеть.

Обратная м. д. с. ротора и м. д. с. статора образуют результирующий поток, вращающийся относительно статора с частотой вращения $n_{об}$, который, взаимодействуя с током статора соответствующей частоты, дает дополнительный так называемый обратный момент.

Обратный момент, как следует из (3-47), меняет свой знак в зависимости от частоты вращения. Пока частота вращения ротора меньше половинной синхронной, т. е. $n_p < 0,5 n_c$, из указанного выше равенства имеем отрицательную частоту вращения $n_{об}$, следовательно, обратный поток вращается относительно статора в направлении, обратном вращению ротора. Взаимодействуя с токами статора той же частоты, он создает движущий момент.

При половинной синхронной частоте вращения $n_p = 0,5 n_c$ имеем $n_{об} = 0$, т. е. обратное поле неподвижно в пространстве и никаких э. д. с. в статоре не индуцируется.

Если частота вращения ротора выше половинной синхронной, т. е. $n_p > 0,5 n_c$, то $n_{об}$ положительна, следовательно, обратный поток вращается в пространстве в направлении вращения ротора. Взаимодействуя с токами статора той же частоты, он создает тормозной момент.

Общий вращающий момент двигателя представляет собой алгебраическую сумму прямого и обратного моментов, т. е.

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{об}}. \quad (3-49)$$

На рис. 3-16 показаны примерные характеристики прямого, обратного и суммарного моментов для асинхронного двигателя при несимметричных сопротивлениях ступеней резистора в роторе.

Провал момента получается тем больший, чем больше несимметрия включенных в ротор сопротивлений ступеней резистора.

На рис. 3-17 показаны толстыми сплошными линиями опытные механические характеристики асинхронного двигателя 7,5 кВт, 380 В, 945 об/мин, снятые при номинальном напряжении сети 380 В и неравных сопротивлениях цепей ротора: R_a , R_b и R_c .

Средняя из этих кривых соответствует, как видно из цифр, наибольшей несимметрии сопротивлений цепей ротора и поэтому имеет и наибольший провал момента.

Естественным является вопрос: нельзя ли использовать провал момента для получения устойчивой полусинхронной частоты вращения двигателя? Устойчивую полусинхронную частоту вращения получить, безусловно, можно, если пустить двигатель из состояния покоя при статическом моменте, большем, чем минимальный момент в точке провала; в этом случае двигатель «застрянет» на полусинхронной частоте вращения. Затем можно заставить двигатель ускориться и дальше до полной частоты вращения путем выравнивания сопротивлений ступеней пускового резистора и выведения их.

Недостатком схемы является трудность перехода простыми и надежными способами с полной частоты

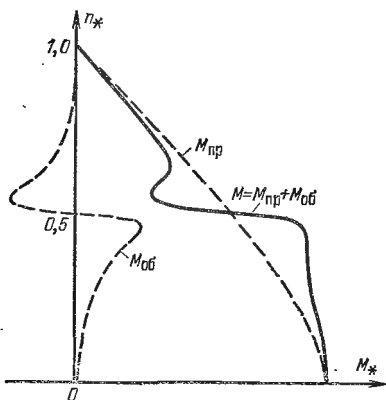


Рис. 3-16. Характеристики моментов: прямого $M_{\text{пр}}$, обратного $M_{\text{об}}$ и общего M для асинхронного двигателя при несимметричных сопротивлениях ступеней резистора в роторе.

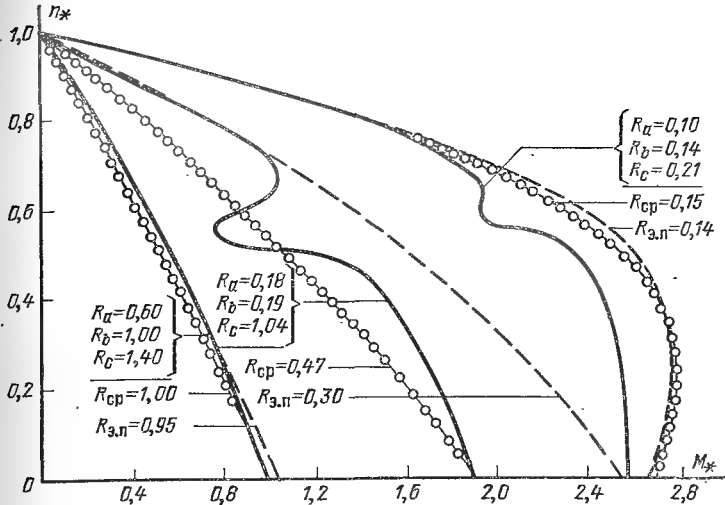


Рис. 3-17. Механические характеристики асинхронного двигателя с неравными сопротивлениями R_a , R_b , R_c цепей ротора (приведены относительные сопротивления).

вращения на полусинхронную, так как несимметрией сопротивлений цепей ротора нельзя создать тормозящий момент для замедления двигателя. Для приводов же обычно требуется именно замедление до предварительной устойчивой пониженной частоты вращения, чтобы получить точную остановку.

Вследствие указанного выше недостатка несимметричное включение сопротивлений ступеней пускового резистора не находит применения для получения устойчивого регулирования частоты вращения. Но оно является ценным в схемах ручного управления двигателями от силовых барабанных контроллеров, потому что позволяет, как будет показано ниже, получить большое число ступеней ускорения при малом количестве коммутирующих элементов.

Точный расчет механических характеристик асинхронных двигателей с несимметричными сопротивлениями цепей ротора очень сложен, если учесть еще, что в этой схеме играет большую роль насыщение, сглаживающее провалы моментов.

Учитывая, что при большом числе ступеней ускорения, применяемых в силовых барабанных контроллерах, несимметрия сопротивлений цепей ротора получается неболь-

шой и провалы момента незначительные, будем для упрощения расчетов заменять несимметричные сопротивления цепей ротора на эквивалентные симметричные. Спрашивается, какие сопротивления цепей ротора принять за эквивалентные симметричные: среднеарифметические, определяемые по формуле

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_a + R_b + R_c}{3}, \quad (3-50)$$

или эквивалентные по электрическим потерям, определяемые по формуле

$$R_{\text{э.п}} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_a R_c}{R_a + R_b + R_c}. \quad (3-51)$$

Чтобы решить этот вопрос, на рис. 3-17 показаны еще механические характеристики для среднеарифметических сопротивлений цепей ротора (тонкие линии с кружками) и для эквивалентных сопротивлений цепей ротора по потерям (пунктирные линии). Как следует из этих кривых, значительное отличие в моменте имеется только для случая большой несимметрии ($R_{\text{ср}*} = 0,47$, $R_{\text{э.п}*} = 0,30$), причем до частоты вращения $0,6 n_c$ более близкой является кривая, построенная по $R_{\text{ср}}$, а выше этой частоты вращения — кривая, построенная по $R_{\text{э.п}}$.

В практических случаях при большом числе ступеней кривые момента, построенные по $R_{\text{ср}}$ и $R_{\text{э.п}}$, настолько близки друг другу, что оба способа определения эквивалентного сопротивления цепи ротора можно считать равноценными.

Как показано ниже, пользование эквивалентными сопротивлениями цепи ротора по потерям упрощает расчеты, а потому нужно их и применять.

Расчеты несимметричных сопротивлений ступеней резистора в роторе нужно вести следующим образом (табл. 3-2):

1. Для каждого положения контроллера нужно рассчитать полные активные сопротивления цепей ротора, как для схемы с симметричными сопротивлениями цепей.
2. Для тех же положений контроллера определить действительные несимметричные полные активные сопротивления каждой цепи ротора так, чтобы механические характеристики двигателя были близки к получаемым при равномерных сопротивлениях цепей.
3. Вычитанием смежных полных сопротивлений каждой цепи ротора находим сопротивления ступеней резистора.

Расчет полных симметричных сопротивлений цепей ротора (п. 1) может быть выполнен или путем выбора требуемых характеристик из имеющихся в наличии семейств механических характеристик, или аналитически, как показано ниже в примере.

При определении действительных несимметричных полных сопротивлений цепей ротора (п. 2), если принять на каждом положении контроллера среднее трех сопротивлений равным симметричному по п. 1, а меньшее и большее соответственно в λ раз меньше и больше этого среднего значения, легко показать, что такое среднее сопротивление равно эквивалентному по потерям. Действительно, считая, например, сопротивление R_a меньшим, R_b средним и R_c большим, по (3-51) получаем:

$$R_{э. п} = \frac{R_b \frac{1}{\lambda} R_b + R_b R_b \lambda + R_b \frac{1}{\lambda} R_b \lambda}{R_b \frac{1}{\lambda} + R_b + R_b \lambda} = R_b. \quad (3-52)$$

Принимая λ равным отношению пиков моментов к моментам переключения, мы получаем, как это видно из табл. 3-2, что на каждом положении контроллера меньшее сопротивление секции равно симметричному сопротивлению предшествующей ступени, а большее — симметричному сопротивлению последующей ступени при переводе контроллера из последнего, рабочего положения в нулевое.

Другими словами, полные сопротивления цепей ротора берут без расчета, используя значения симметричных сопро-

Таблица 3-2

Расчет сопротивлений пусковых ступеней и противовключения для несимметричной схемы пускового резистора (рис. 3-18)

Положение контроллера	Относительные симметричные полные сопротивления цепей ротора	Относительные действительные несимметричные полные сопротивления цепей ротора			Относительные сопротивления ступеней резистора		
		I	II	III	I	II	III
1	$R_1=1,03$	0,65	1,64	1,03	—	$r_{14}=1,232$	—
2	$R_2=0,65$	0,65	0,408	1,03	—	—	$r_{17}=0,774$
3	$R_3=0,408$	0,65	0,408	0,256	$r_{12}=0,489$	—	—
4	$R_4=0,256$	0,161	0,408	0,256	—	$r_{45}=0,307$	—
5	$R_5=0,161$	0,161	0,101	0,256	—	—	$r_{78}=0,1924$
6	$R_6=0,101$	0,161	0,101	0,0636	$r_{23}=0,121$	—	—
7	$R_7=0,0636$	0,04	0,101	0,0636	—	$r_{56}=0,061$	$r_{89}=0,0236$
8	$R_{II}=0,04$	0,04	0,04	0,04	—	—	—

Примечание. Последовательность всего расчета снизу вверх.

тивлений цепей; исключение составляет большее сопротивление цепи на первом положении контроллера, которое рассчитывается умножением среднего на λ (в табл. 3-2 это $R_{1*} \lambda = 1,03 \cdot 1,59 = 1,64$).

Следует отметить, что существующие контроллеры закорачивают на последнем положении одновременно две секции резистора, а некоторые и три, для получения меньшей несимметрии токов. Закорачиваемые одновременно секции нужно учитывать как одну ступень при определении равномерных сопротивлений цепей.

Расчет не по эквивалентным потерям, а по среднеарифметическим значениям сопротивлений $R_{ср}$ также несложен. При этом способе необходимо для предпоследнего положения контроллера принять среднее сопротивление цепей равным симметричному, меньшее останется, как в последнем положении контроллера, а большее определится из равенства (3-50):

$$R_c = 3R_{ср} - R_a - R_b, \quad (3-53)$$

где $R_{ср}$ — расчетное симметричное сопротивление цепи ротора на данном положении контроллера (второй столбец в табл. 3-2); R_c , R_b , R_a — соответственно искомое большое сопротивление цепи ротора на том же положении контроллера, среднее и меньшее.

На следующих положениях контроллера при рассмотрении постепенного его перевода из последнего рабочего в нулевое будет увеличиваться каждый раз только одно, наименьшее, сопротивление цепи ротора, становясь наибольшим, определяемым из (3-53).

В этом случае только в предпоследнем положении контроллера одно полное сопротивление цепи ротора будет равно симметричному, в остальных же положениях ни одно сопротивление цепи ротора не будет равно симметричному.

Пример 3-6. Рассчитать сопротивления ступеней пускового резистора для асинхронного двигателя типа МТ-52-8, 380 В, 30 кВт, 752 об/мин, $E_{р.н} = 257$ В, $I_{р.н} = 74,3$ А, $M_{м*} = 3$ при ПВ = 25%, служащего для привода кабестана цеха разливающих машин для чугуна и управляемого контроллером силового тока типа КТ-3005 (рис. 3-18).

Решение. Вначале определим симметричные полные сопротивления цепей ротора.

Номинальное скольжение

$$s_n = \frac{750 - 725}{750} = 0,033.$$

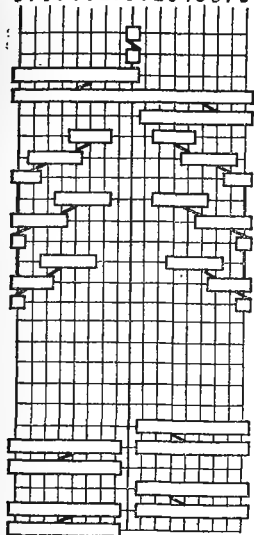
Учитывая сопротивление внешних проводов от ротора к контроллеру около $0,01 R_{p.n.}$, примем в расчетах $s_n = 0,04$.

Переключающие моменты примем равными номинальному, т. е. $M_{2*} = 1$. Учитывая, что при переводе контроллера КТ-3005 в последнее положение закорачиваются одновременно две секции, будем иметь при восьми секциях число ступеней семь.

Контроллер КТ-3005

Назад Вперед

87654321012345678



Вспомогательные
цепи управления

I II III

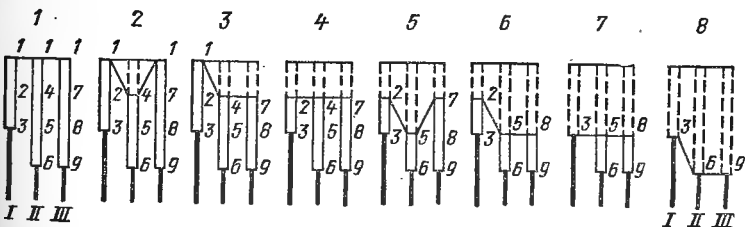
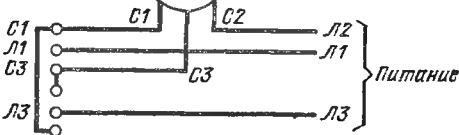
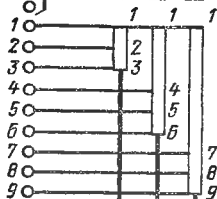


Рис. 3-18. Схема управления асинхронным двигателем с несимметричными сопротивлениями ступеней пускового резистора в роторе.

Одну ступень оставим для противовключения; тогда число ступеней ускорения $m = 6$.

Поскольку число пусковых ступеней большое и моменты переключения небольшие, можно с достаточной степенью точности считать сопротивления секций по прямолинейным механическим характеристикам.

По (3-45) имеем:

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{s_H M_*}} = \sqrt[6+1]{\frac{1}{0,04 \cdot 1}} = \sqrt[7]{25}.$$

Логарифмируем обе части равенства

$$\lg \lambda = \frac{1}{7} \lg 25 = \frac{1}{7} \cdot 1,398 = 0,2,$$

откуда потенцированием находим:

$$\lambda = 1,59.$$

Пики момента равны:

$$M_{1*} = M_{2*} \lambda = 1 \cdot 1,59 = 1,59.$$

Полные симметричные сопротивления цепей найдутся:

$$R_{7*} = s_H \lambda = 0,04 \cdot 1,59 = 0,0636;$$

$$R_{6*} = s \lambda = 0,0636 \cdot 1,59 = 0,101;$$

$$R_{5*} = s_6 \lambda = 0,101 \cdot 1,59 = 0,161$$

и т. д.

Все вычисленные сопротивления внесены в табл. 3-2, где $r_{14} = 1,232$ есть ступень противовключения.

3-6. ПУСК С РЕАКТОРАМИ В РОТОРЕ

Реакторы позволяют получить плавное ускорение привода при малом количестве ступеней ускорения. Их можно присоединить либо последовательно, либо параллельно с добавочными резисторами.

1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ РЕАКТОРОВ

Реакторы играют роль автоматического регулятора тока ротора. В начальный момент пуска двигателя при частоте тока в роторе, равной частоте тока в сети, реактивное сопротивление реактора велико и ограничивает пусковой ток. При ускорении двигателя падает э. д. с. ротора, но одновременно уменьшаются частота и реактивное сопротивление реактора, в результате чего ток ротора будет спадать замедленно, т. е. не так быстро, как при добавочном резисторе. С уменьшением реактивного сопротивления растет коэффициент мощности цепи ротора.

Очевидно, что момент двигателя, определяемый произведением практически постоянного магнитного потока тока ротора на коэффициент мощности, будет при ускорении стремиться сохранять свое значение и вначале может даже несколько увеличиваться.

На рис. 3-19 даны пусковые характеристики тока ротора и момента для асинхронного двигателя типа МТ-72-10, 380 В, 100 кВт, 584 об/мин при $\text{ПВ}=25\%$, $E_{p.n} = 368$ В, $I_{p.n} = 170$ А, $r_p = 0,03$ Ом, $x_p = 0,082$ Ом при наличии в роторе добавочных резисторов и реакторов, при одних реакторах (замкнут 1У) и при замкнутых роторе (замкнуты 1У, 2У).

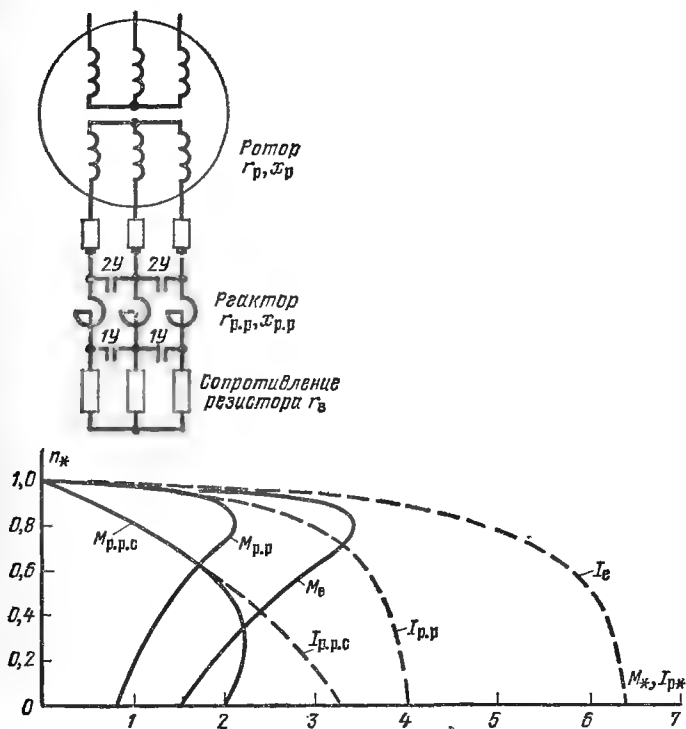


Рис. 3-19. Пусковые характеристики асинхронного двигателя при последовательном присоединении реакторов.

$M_{p.p.c}$ и $I_{p.p.c}$ при $r_{в*} = 0,15$, $r_{p.p*} = r_{p*} = 0,25$, $x_{p.p*} = 3x_{p*} = 0,2$; $M_{p.p}$ и $I_{p.p}$ при $r_{в*} = 0$, $r_{p.p*} = r_{p*} = 0,25$, $x_{p.p*} = 3x_{p*} = 0,2$ (замкнут 1У); M_e , I_e — естественные характеристики (замкнуты 1У, 2У).

Эта схема есть шаг вперед по сравнению с нормальными схемами пуска с резисторами в роторе.

При пуске с резисторами в роторе (см. рис. 3-13) с нормальным числом ступеней, равным *тремя*, при 2,2-кратных

пиках момента моменты переключения получаются около 0,8 номинального. В случае же пуска с последовательно присоединенными реакторами только при *двух* ступенях и тех же 2,2-кратных максимальных моментах момент переключения, как видно из рис. 3-19, равен 1,75-кратному номинальному.

Недостатком схемы является необходимость иметь специально рассчитанные реакторы.

Рассмотрим способ расчета механических характеристик асинхронного двигателя при последовательно присоединенных реакторах. Полное сопротивление линии ротора (рис. 3-19) равно:

$$z = \sqrt{R^2 + (Xs)^2}; \quad (3-54)$$

$$\cos \varphi_p = R/z, \quad (3-55)$$

где

$$R = r_p + r_{p.p} + r_b \quad \text{и} \quad X = x_p + x_{p.p}.$$

Ток цепи ротора

$$I_p \approx \frac{E_{p.нs^*}}{\sqrt{3}z}. \quad (3-56)$$

Момент двигателя (Н·м) по (3-37) равен:

$$M = \frac{28,6}{n_c} \frac{I_p^2 R}{s}, \quad (3-57)$$

где n_c — синхронная частота вращения, об/мин.

Зная внутреннее сопротивление ротора r_p , x_p , сопротивление добавочного резистора r_b и реактора $r_{p.p}$, $x_{p.p}$, определяем для разных скольжений s вначале z из (3-54), затем I_p из (3-56) и, наконец, M по (3-57).

2. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ РЕАКТОРОВ

В начале пуска сопротивление реакторов велико из-за большой частоты тока в роторе и почти весь ток идет через резисторы, которые поэтому определяют собой начальные пусковой ток и момент. При ускорении по мере увеличения частоты вращения двигателя будет уменьшаться частота тока ротора, соответственно будет падать реактивное сопротивление реакторов и ток ротора будет переходить с рези-

* Выражение (3-56) приближенное, так как оно не учитывает уменьшение э. д. с. ротора при больших токах статора.

сторов в реакторы. При частоте вращения, близкой к синхронной, частота тока ротора снизится примерно до 1—2 Гц, реактивное сопротивление реакторов упадет почти до нуля и почти весь ток ротора пойдет через реакторы, имеющие малое активное сопротивление и потому мало снижающие частоту вращения.

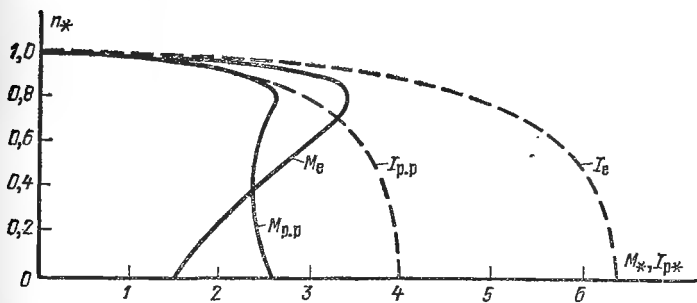
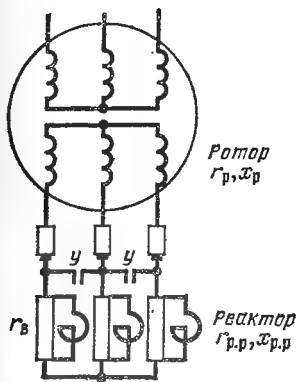


Рис. 3-20. Пусковые характеристики асинхронного двигателя при параллельном присоединении реакторов.

$M_{p.p.}, I_{p.p.}$ при $r_{B*} = 0,4$; $r_{p.p.*} = r_{p*} = 0,025$, $x_{p.p.*} = 3x_{p*} = 0,195$; M_e, I_e — естественные характеристики (замкнут $У$).

При этой схеме ток ротора поддерживается почти постоянным, коэффициент мощности ротора вначале держится постоянным, а затем немного растет и момент двигателя держится почти постоянным во всем диапазоне ускорения.

На рис. 3-20 даны пусковые характеристики рассмотренного выше асинхронного двигателя типа МТ-72-10, 100 кВт, 380 В. Для сравнения даны естественные харак-

теристики момента и тока ротора и искусственные для реактивного сопротивления реакторов $x_{p.p*} = 3x_{p*} = 0,195$ при сопротивлениях добавочного резистора $r_{в*} = 0,4$ и реактора $r_{p.p*} = r_{p*} = 0,025$.

Из сравнения кривых рис. 3-19 и 3-20 очевидно, что механические характеристики двигателя при параллельно включенных реакторах значительно лучше, чем при последовательно включенных. Кроме того, в этой схеме применен всего один контактор ускорения У.

Можно было бы не применять и этот единственный контактор ускорения, закорачивающий реакторы с добавочным резистором, так как снижение частоты вращения полу-

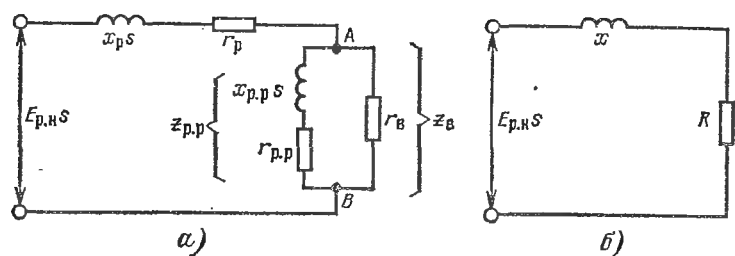


Рис. 3-21. Схемы одной линии ротора при параллельном включении реакторов.

а — полная схема; б — эквивалентная схема с переменными R и X .

чается незначительным. Однако это потребовало бы увеличения габаритов реакторов, потому что их пришлось бы рассчитать по нагреву не только на пусковой, но еще и на рабочий ток. Кроме того, был бы понижен максимальный момент двигателя против естественного, что может быть неприемлемым для приводов, работающих с перегрузкой.

Применив реакторы с другими параметрами, можно получить искусственные механические характеристики с другими пусковыми моментами, также почти неизменными при ускорении.

Наблюдаемое на рис. 3-20 некоторое увеличение момента с ростом частоты вращения можно при надобности ликвидировать включением небольших добавочных к реакторам резисторов, увеличивающих сопротивления ветвей реакторов.

Для того чтобы реакторы были минимальных габаритов, они должны выполняться с замкнутой стальной магнитной системой.

Следует обратить внимание, что при наличии реакторов относительные значения тока ротора значительно выше относительных значений момента, тогда как при добавочных резисторах они примерно равны. Этот недостаток ограничивает область применения схем с реакторами. Реакторы могут успешно применяться для приводов с продолжительным режимом работы, где время пуска составляет небольшую долю от общего времени работы (например, шахтные подъемники, некоторые экскаваторы, канатные транспортеры), и ограничено применяться для приводов с очень частыми пусками (например, некоторые приводы в прокатных цехах).

Рассмотрим, как рассчитать характеристики асинхронного двигателя при параллельно присоединенных реакторах к добавочным резисторам.

Схему рис. 3-20 можно представить в упрощенном виде для одной цепи ротора, как показано на рис. 3-21. Полная проводимость цепи между точками A и B

$$\frac{1}{Z_{AB}} = \frac{1}{Z_{p.p}} + \frac{1}{Z_B},$$

откуда

$$Z_{AB} = \frac{Z_B Z_{p.p}}{Z_B + Z_{p.p}}.$$

Но $Z_{p.p} = r_{p.p} + jx_{p.p}s$, а $Z_B = r_B$.

Поэтому подстановкой получим:

$$Z_{AB} = \frac{r_B (r_{p.p} + jx_{p.p}s)}{r_B + r_{p.p} + jx_{p.p}s} = \frac{r_B (r_{p.p} + jx_{p.p}s)}{(r_B + r_{p.p}) + jx_{p.p}s}.$$

Умножим числитель и знаменатель на $(r_B + r_{p.p}) - jx_{p.p}s$ и обозначим $r_B + r_{p.p} = r$, тогда

$$Z_{AB} = \frac{r_B r_{p.p} r + r_B x_{p.p}^2 s^2}{r^2 + x_{p.p}^2 s^2} + j \frac{r_B^2 x_{p.p} s}{r^2 + x_{p.p}^2 s^2}.$$

Очевидно, что первый член этого равенства есть активное сопротивление цепи между точками A и B , а второй член при j — реактивное.

Суммарное активное сопротивление цепи ротора (рис. 3-21) получится

$$R = r_p + \frac{r_{p.p} r + x_{p.p}^2 s^2}{r^2 + x_{p.p}^2 s^2} r_B \quad (3-58)$$

и суммарное реактивное сопротивление

$$X = x_p s + \frac{r_B^2 x_{p.p} s}{r^2 + x_{p.p}^2 s^2}. \quad (3-59)$$

Полное сопротивление цепи ротора при любом скольжении получим:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (3-60)$$

$$\cos \varphi_p = R/z. \quad (3-61)$$

Ток в цепи ротора

$$I_p \approx \frac{E_{p. нс}}{\sqrt{3} z}, \quad (3-62)$$

и, наконец, момент

$$M = \frac{28,6}{n_c} \frac{R I_p^2}{s}. \quad (3-63)$$

Зная сопротивления ротора двигателя r_p , x_p , реактора $r_{p.p}$, $x_{p.p}$ и добавочного резистора $r_{в}$, можем, задаваясь различными скольжениями и решая последовательно (3-58) — (3-63), определить ток ротора I_p и момент M .

Габариты реакторов получаются небольшими и соизмеримыми с габаритами ротора. Действительно, для получения искусственных характеристик, приведенных на рис. 3-20, приняты реакторы, имеющие активные сопротивления, равные внутреннему активному сопротивлению цепи ротора ($r_{p.p} = r_p$), а реактивные — 3- и 4-кратные внутреннему реактивному сопротивлению цепи ротора [$x_{p.p} = (3 \div 4) x_p$]. Здесь нужно учитывать, что для ротора сопротивление x_p есть реактивное сопротивление только от потоков рассеяния, а для реакторов, которые нужно выполнять со стальным сердечником, реактивное сопротивление определяется полным потоком, сцепленным с витками реактора.

Расчет требуемых параметров пусковых реакторов проще всего вести путем выбора реактивности реакторов на основании сравнения желаемых характеристик с примерными характеристиками рис. 3-20. После предварительного выбора параметров реактора нужно просчитать характеристику по (3-58) — (3-63).

3-7. ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕ

1. РЕЖИМ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

Режим противовключения асинхронного двигателя, так же как и двигателя постоянного тока (§ 2-7), может быть получен двумя способами: перетягивающим грузом или переключением вращающегося двигателя на обратное

направление вращения. В обоих случаях двигатель принудительно вращается в направлении, противоположном тому, для которого включены в сеть его обмотки. Очевидно, что в этом режиме по сравнению с неподвижным состоянием ротора в роторе будут повышенные э. д. с. и ток вследствие более быстрого пересечения обмоток ротора вращающимся потоком статора.

Режим противовключения асинхронного двигателя, как и других видов двигателей, есть генераторный режим, при котором двигатель преобразовывает кинетическую

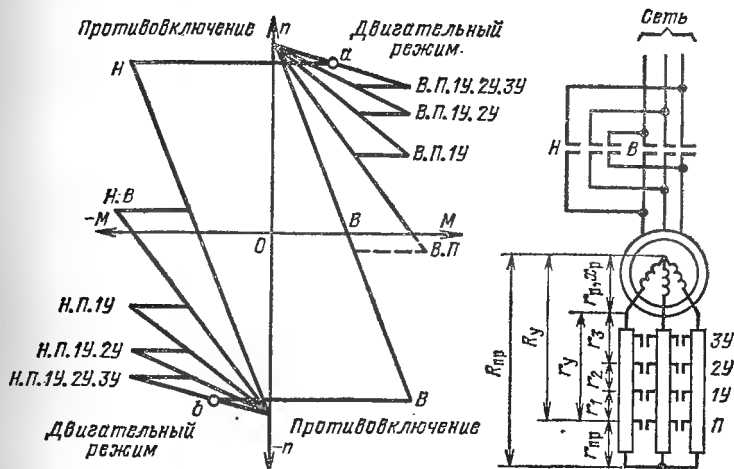


Рис. 3-22. Механические характеристики пусковые и противовключения и схема главных цепей асинхронного двигателя.

энергию вращающихся по инерции масс или потенциальную энергию опускающегося груза в электрическую, переходящую в тепловую энергию в сопротивлениях роторной цепи. Одновременно двигатель работает как трансформатор, забирая энергию из сети и расходуя ее в тех же сопротивлениях.

При переходе двигателя в режим противовключения в ротор вводится добавочное сопротивление — «ступень противовключения», которое вместе с сопротивлением пускового резистора ограничивает ток двигателя до допускаемых и желаемых величин.

На рис. 3-22 показаны схема главных цепей и механические характеристики ускорения и противовключения

асинхронного двигателя с фазным ротором. По этой схеме при переключении на обратный ход двигателя, например привода моста крана, вводится сопротивление пусковой ступени и ступени противовключения, которая опять закоротится контактором Π , когда двигатель замедлится почти до состояния покоя, после чего двигатель будет ускоряться в обратном направлении и последовательное во времени замыкание контакторов ускорения $1У, 2У, 3У'$ доведет его до естественной характеристики. При пуске двигателя из состояния покоя ступень противовключения закорачивается вслед за контакторами направления B или H и выполняет роль предварительной ступени.

2. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТУПЕНИ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

Сопротивление ступени противовключения проще всего определить, пользуясь семейством механических характеристик, как на рис. 3-6. Предположим, для подъемной лебедки требуется ограничить скорость опускания груза в режиме противовключения до 0,5 номинальной при грузе, составляющем 1,3-кратному моменту двигателя, причем полное сопротивление ступени ускорения известно из расчета сопротивления пускового резистора $R_{y*} = r_{p*} + r_{y*} = 0,5$.

Из кривой рис. 3-6 следует, что для получения частоты вращения опускания $n_* = -0,5$ при моменте двигателя $M_* = 1,3$ нужно иметь полное сопротивление цепи ротора $R_{p*} = 1,1$. Сопротивление ступени противовключения получится:

$$r_{пр*} = R_{p*} - R_{y*} = 1,1 - 0,5 = 0,6.$$

В приводах подъема кранов, где требуются различные скорости опускания разных по весу грузов, применяется несколько ступеней противовключения.

Также легко рассчитать сопротивление ступени противовключения, применяемое для ограничения тока и момента двигателя при переключении его на обратный ход. В этом случае обычно принимают при максимально возможной частоте вращения пик момента противовключения равным пусковым пикам момента. Например, при полном сопротивлении ступеней ускорения $R_{y*} = 0,5$ из рис. 3-6 имеем пусковой момент $M_{1*} = 1,8$. Предположим, что переключение на обратный ход производится при холостом ходе

двигателя, т. е. почти при синхронной частоте вращения, тогда для получения пика момента противовключения $M_{пр*} = 1,8$ при частоте вращения $n_* = -1$ согласно рис. 3-6 нужно иметь полное сопротивление цепи ротора $R_{р*} = 1$. Сопротивление ступени противовключения получится $r_{пр*} = R_{р*} - R_{у*} = 1 - 0,5 = 0,5$.

Теперь рассмотрим, как рассчитать сопротивление ступени противовключения, если нет семейства механических характеристик двигателя.

Для принятой точки противовключения ($M_{пр*}$, $s_{пр}$) определяем критическое скольжение s_k из (3-55), зная $M_{м*}$ и q . Затем, подставляя найденное значение s_k в ту же формулу, определяем при номинальном моменте, т. е. $M_* = 1$, скольжение $s_{и.н.}$.

Полное сопротивление цепи ротора найдем при помощи (3-25), т. е.

$$R_{р*} = r_{р*} s_{и.н.} / s_{е.н.} \quad (3-64)$$

где $s_{е.н.} = s_n$ — номинальное скольжение.

Сопротивление ступени противовключения найдется вычитанием известного сопротивления ступеней ускорения, т. е.

$$r_{пр*} = R_{р*} - R_{у*} \quad (3-65)$$

Приближенный способ расчета основан на замене криволинейных механических характеристик двигателя прямолинейными и применяется в тех случаях, когда и пусковые характеристики принимаются прямолинейными. Через заданную точку режима противовключения $M_{пр*}$, $s_{пр}$ строится луч из точки $s = 0$ и затем на вертикали номинального момента определяется сопротивление ступени противовключения в относительных значениях по правилу (3-31), согласно которому при номинальном моменте асинхронного двигателя изменение скольжения равно изменению относительного сопротивления добавочного резистора.

3-8. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

Динамическое торможение асинхронных двигателей получило широкое распространение в Советском Союзе в связи с массовым внедрением двигателей переменного тока в прокатных цехах металлургических заводов. Оно применяется для быстрой и точной остановки многих механизмов, а также для сокращения времени остановки главных приводов клетей и двигатель-генераторов с маховиками.

Динамическое торможение асинхронного двигателя можно получить, если при вращении ротора отключить статор от сети трехфазного тока и подать в его обмотки постоянный ток. Образуется неподвижное поле статора, оно будет наводить в обмотках вращающегося ротора э. д. с., которая в свою очередь вызовет ток в роторе. Взаимодействие неподвижного потока статора с током ротора создает тормозной момент. Двигатель будет тормозиться, и при полной остановке упадут до нуля э. д. с., ток ротора и тормозной момент.

Очевидно, что асинхронный двигатель при динамическом торможении работает в режиме синхронного генератора.

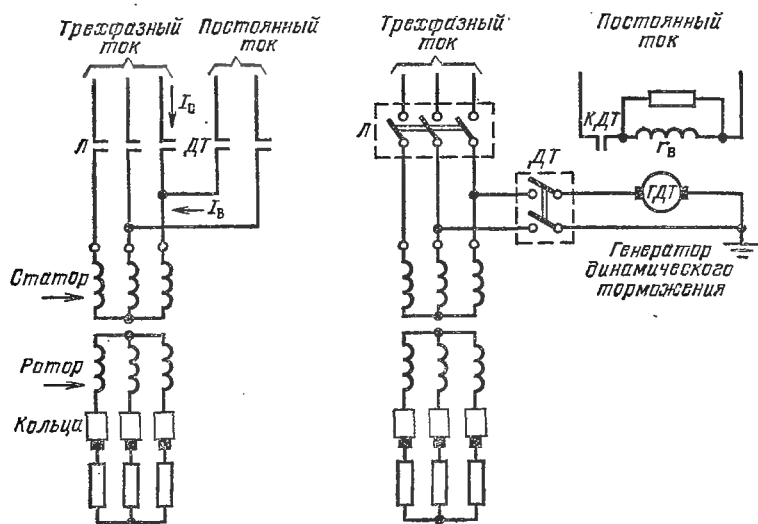


Рис. 3-23. Схемы динамического торможения асинхронных двигателей.

На рис. 3-23 показаны схемы главных цепей динамического торможения для низковольтных и высоковольтных двигателей. Заметим, что в обеих схемах необходимо иметь надежную механическую блокировку, запрещающую одновременное включение контакторов или масляных выключателей линейного и динамического торможения.

Для высоковольтных двигателей следует ставить масляный выключатель ДТ без масла, либо воздушный выключатель, либо разъединитель мощности с соленоидным при-

водом и схему строить так, чтобы этот выключатель не включал ток и не рвал его, а служил лишь разъединителем. Чтобы выполнить эти условия, нужно подавать возбуждение (замыкание КДТ) генератору динамического торможения после включения выключателя ДТ и снимать возбуждение перед отключением.

2. МАГНИТНЫЙ ПОТОК СТАТОРА

Характеристики динамического торможения асинхронного двигателя в сильной степени зависят от формы кривой намагничивания. Если эту кривую построить в относительных значениях, то она может быть принята с удовлетворительной точностью как универсальная для большинства типов нормальных двигателей, а именно для двигателей общего применения длительного режима, для краново-

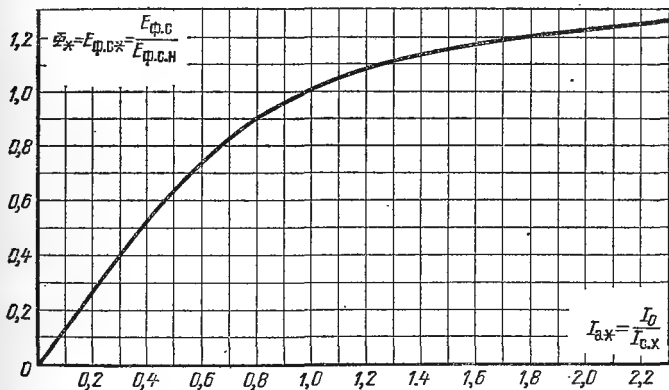


Рис. 3-24. Универсальная кривая намагничивания для асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТ и с короткозамкнутым ротором типа МТК.

металлургических, рольганговых и даже крупных прокатных двигателей. Все эти двигатели выполняются по соображениям минимальной массы насыщенными с близкими по форме кривыми намагничивания.

На рис. 3-24 дана универсальная кривая намагничивания, построенная как средняя для краново-металлургических двигателей типов МТ и МТК. По горизонтальной оси отложены токи намагничивания I_0 , отнесенные к току холостого хода, по вертикали — магнитный поток Φ ,

отнесенный к получаемому при токе намагничивания $I_0 \approx I_{с.х.}$, или же э. д. с. фазы статора $E_{ф.с.}$, отнесенная к получаемой при номинальном потоке.

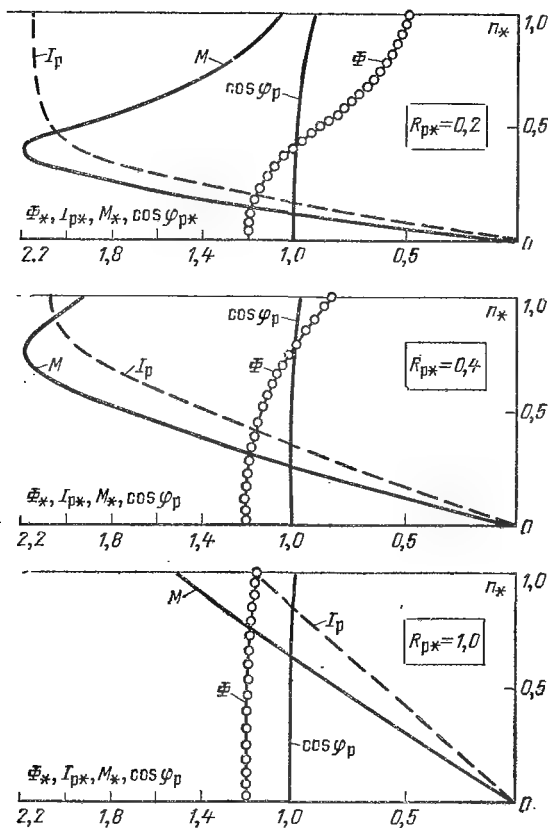


Рис. 3-25. Характеристика потока Φ , тока ротора I_p , момента M и $\cos \varphi$ для асинхронного двигателя в режиме динамического торможения при полных сопротивлениях цепи ротора $R_{p*} = 0,2; 0,4$ и 1 и при возбуждении постоянным током $I_B = 3I_{с.х.}$.

Если при двигательном режиме, как известно, магнитный поток асинхронного двигателя остается почти постоянным при любых нагрузках и частотах вращения, то при динамическом торможении поток двигателя сильно меня-

ется. Кривые рис. 3-25 показывают, как изменяется поток Φ асинхронного двигателя в зависимости от частоты вращения двигателя при подаче в статор (две фазы последовательно) постоянного тока, 3-кратного трехфазному току холостого хода для трех значений полного сопротивления цепи ротора: $R_{p*} = 0,2; 0,4$ и 1 .

Малые потоки при больших частотах вращения получаются вследствие размагничивающего действия м. д. с. ротора. При замедлении ротора по мере спадания тока в нем размагничивающее действие уменьшается и потому поток двигателя растет.

В асинхронных двигателях при динамическом торможении размагничивающее действие ротора (реакция ротора) сказывается особенно сильно, так как они полностью и имеют малый воздушный зазор.

В двигательном режиме м. д. с. ротора также стремится уменьшить главный поток. Но здесь уменьшение потока приводит к уменьшению э. д. с. статора, направленной против приложенного напряжения сети, благодаря чему растет ток статора и поток двигателя почти восстанавливается. Таких сил для восстановления потока нет при генераторном режиме двигателя.

Чем же объяснить, что при малых сопротивлениях добавочных резисторов в роторе размагничивающее действие сильнее, чем при больших? При малых сопротивлениях добавочных резисторов мы имеем больший ток ротора, а следовательно, получается более сильное размагничивание. Кроме того, при малых активных сопротивлениях в цепи ток ротора отстает на больший угол от э. д. с., получается меньшая равнодействующая м. д. с. от статора и ротора и, следовательно, меньший поток. При снижении частоты вращения ток ротора становится малым, угол сдвига фаз в роторе уменьшается и поток двигателя становится одинаковым и максимальным при любых сопротивлениях добавочных резисторов в роторе.

3. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И ТОК РОТОРА

Известно, что э. д. с. ротора пропорциональна потоку двигателя и частоте вращения ротора. Поэтому при полном сопротивлении цепи ротора $R_{p*} = 1$, когда поток почти постоянен (рис. 3-25, внизу), э. д. с., а следовательно, и ток ротора будут падать пропорционально частоте вращения — по прямолинейному закону. Эта характеристика

имеет такой же вид, как характеристика тока якоря двигателя параллельного возбуждения постоянного тока.

При небольших сопротивлениях добавочных резисторов в роторе, например $R_{p*} = 0,2$ (рис. 3-25, вверху), с уменьшением частоты вращения двигателя поток растет, вследствие чего э. д. с. и ток ротора остаются вначале постоянными, и далее, когда поток перестает расти, э. д. с. и ток ротора начинают резко уменьшаться.

Следует отметить, что при частотах вращения двигателя до номинальной напряжение ротора не может быть очень

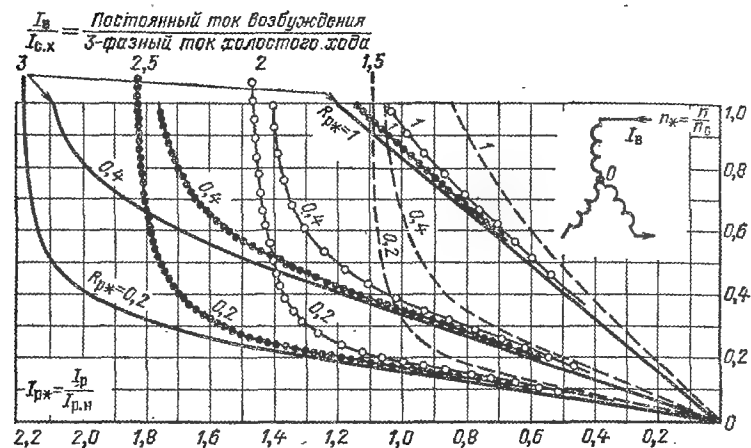


Рис. 3-26. Универсальные характеристики тока ротора при динамическом торможении для асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТ.

большим и опасным даже при больших токах возбуждения, так как нормальные асинхронные двигатели строятся насыщенными и, кроме того, поток снижается от размагничивающего действия ротора. На рис. 3-26 даны семейства универсальных (средних) характеристик тока ротора в зависимости от частоты вращения для двигателей с фазным ротором при разных токах возбуждения I_v и трех значениях относительного полного сопротивления цепи ротора R_{p*} для каждого тока возбуждения.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

Способы расчета механических характеристик асинхронных двигателей при динамическом торможении приведем позже, а сейчас рассмотрим их физическую сущность.

На рис. 3-27 даны механические характеристики динамического торможения, рассчитанные для краново-металлургического двигателя с фазным ротором типа МТ-31-6, 11 кВт, 955 об/мин при ПВ=25%. Поскольку кривая намагничивания этого двигателя близка к универсальной рис. 3-24, то эти характеристики являются также универсальными и пригодными для других двигателей.

Механические характеристики построены для разных постоянных токов возбуждения: $I_B = 1,5; 2; 2,5$ и 3-кратного трехфазному току холостого хода $I_{с.х.}$. Меньшие токи

$$\frac{I_B}{I_{с.х.}} = \frac{\text{Постоянный ток возбуждения}}{\text{3-фазный ток холостого хода}}$$

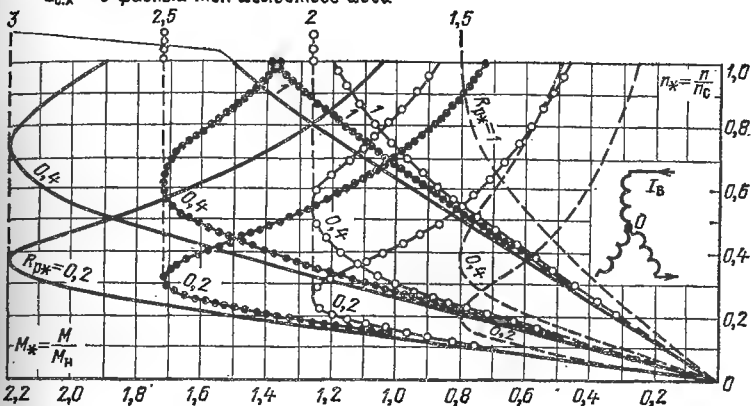


Рис. 3-27. Универсальные механические характеристики динамического торможения для асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТ (цифры 0,2; 0,4 и 1 при кривых обозначают полные сопротивления цепи ротора по отношению к номинальному $R_{р.н.}$).

возбуждения могут выбираться для крупных двигателей длительного режима, для которых удовлетворительным является время остановки порядка нескольких минут, но при этом желательно сэкономить на установленной мощности возбудительного агрегата. Большие токи возбуждения можно рекомендовать, например, для двигателей механизмов прокатных станов, где обычно требуется быстрая остановка порядка 1 с, но где расход электроэнергии на возбуждение не играет существенной роли. Токи возбуждения указаны на рис. 3-27 условно против максимальных моментов двигателя.

Для обобщения характеристик двигателей разных типов кратности тока возбуждения взяты не от номинального

тока статора, а от тока холостого хода, определяющего магнитный поток.

Для каждого тока возбуждения построены три характеристики, соответствующие полному активному сопротивлению цепи ротора $R_{p*} = 0,2; 0,4$ и 1 номинального. Сопротивление ступени, дополняющее сопротивление линии ротора до $R_{p*} = 0,2$, часто выбирается как постоянно включенное в тех случаях, когда асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором не проходят по нагреву при большой частоте включений и вместо них применяются двигатели с фазным ротором. Сопротивление $R_{p*} = 0,4$ — это обычное значение полного сопротивления пускового резистора (сопротивление ступеней ускорения) в схемах контакторного управления. Сопротивление $R_{p*} = 1$ — также обычное полное сопротивление пускового резистора со ступенью противовключения.

Форму механических характеристик нетрудно обосновать, рассматривая одновременно механические характеристики рис. 3-27 с кривыми потока и тока ротора рис. 3-25. Поскольку в рассматриваемых случаях в цепь ротора включено значительное сопротивление добавочного резистора, $\cos \varphi_r$ близок к единице и тормозной момент можно рассматривать приблизительно пропорциональным только потоку двигателя и току ротора.

При $R_{p*} = 1$ механические характеристики двигателя при разных токах возбуждения почти прямолинейны потому, что поток постоянен, а ток ротора так же как э. д. с. падает с уменьшением частоты вращения по прямой.

При сопротивлении цепи ротора, например $R_{p*} = 0,2$, при 3-кратном токе возбуждения, начиная с $n_* = 1$ и до 0,4 номинальной, момент растет потому, что растет поток при неизменном токе ротора. Затем при частоте вращения ниже 0,4 момент быстро падает, так как поток перестает расти, а ток ротора перестает быть постоянным и резко снижается до нуля.

Из семейств механических характеристик рис. 3-27 легко видеть доказываемый ниже весьма важный закон, а именно: *при данном токе возбуждения для любого данного момента частота вращения двигателя пропорциональна полному активному сопротивлению цепи ротора*. Так, при $M_* = 1,5$ и 3-кратном токе возбуждения, если при сопротивлении цепи 0,2 $R_{p.n}$ частота вращения равна 0,2 n_c , то при сопротивлении цепи 0,4 $R_{p.n}$ она равна 0,4 n_c , а при сопротивлении цепи 1 $R_{p.n}$ равна 1 n_c .

Поэтому достаточно иметь механические характеристики только для одного значения сопротивления цепи ротора, а для других любых механические характеристики могут быть построены при помощи простой пропорции.

5. СХЕМЫ И РАСЧЕТЫ ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Вывод формулы механических характеристик динамического торможения асинхронного двигателя будем вести, рассматривая его в этом режиме как асинхронную машину. Для этого нужно постоянный ток возбуждения I_c привести к эквивалентному по м. д. с. трехфазному току статора I_c .

Рассмотрим возможные схемы подачи тока к фазам статора асинхронного двигателя (табл. 3-3), исключив при этом явно нерациональные, например подачу постоянного тока в одну фазу.

Таблица 3-3

Сравнение схем включения фаз статора

	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4	Схема 5	Схема 6
Схема включения фаз статора						
Сложение м. д. с. фаз статора						
$\frac{I_c}{I_B}$	0,816	0,707	0,943	0,816	0,707	1,632

Нетрудно показать, что, например, для аналогичных схем 1 и 4 включения статора линейный трехфазный ток статора составляет 0,816 эквивалентного по м. д. с. постоянного тока возбуждения. Пользуясь диаграммой м. д. с.

для схемы 1, напишем результирующую м. д. с. от постоянного тока возбуждения:

$$F_{\text{пост}} = 2I_{\text{в}}\omega_c \cos 30^\circ = 2I_{\text{в}}\omega_c \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_{\text{в}}\omega_c.$$

Известно, что при трехфазном токе результирующая м. д. с. от трех фаз постоянна в каждый данный момент времени (как и при возбуждении постоянным током) и равна 1,5-кратному амплитудному значению м. д. с. одной фазы, т. е.

$$F_{\text{трехф}} = 1,5 \sqrt{2} I_c \omega_c.$$

Приравнивая м. д. с. от трехфазного и постоянного токов, получаем:

$$1,5 \sqrt{2} I_c \omega_c = \sqrt{3} I_{\text{в}} \omega_c,$$

откуда $I_c = 0,816 I_{\text{в}}$.

По схеме 4 аналогично м. д. с. от постоянного тока возбуждения

$$F_{\text{пост}} = \frac{1}{3} I_{\text{в}} \omega_c + \frac{2}{3} I_{\text{в}} \omega_c = I_{\text{в}} \omega_c.$$

Также от трехфазного тока, учитывая, что линейный ток при соединении фаз статора в треугольник в $\sqrt{3}$ раз больше фазного, получаем:

$$F_{\text{трехф}} = 1,5 \sqrt{2} \left(\frac{I_c}{\sqrt{3}} \right) \omega_c.$$

Приравнивая $F_{\text{пост}}$ и $F_{\text{трехф}}$, в результате получаем такое же соотношение

$$I_c = 0,816 I_{\text{в}}.$$

Подобным образом выведены указанные в табл. 3-3 соотношения и для других схем.

Из табл. 3-3 и дополнительных расчетов можно сделать вывод, что для динамического торможения рационально применять при соединении статора в звезду только схему 1, а при соединении в треугольник — схему 4.

Эти схемы являются наиболее простыми, дешевыми и надежными, так как требуют наименьшего количества внешних проводов по сравнению со схемами 3 и 6 и наименьшего количества силовых контакторов для подачи трехфазного тока при двигательном режиме и постоянного тока при динамическом торможении по сравнению со всеми другими схемами.

По потребляемой обмотками статора мощности и нагреву обмоток для создания одинаковой м. д. с., как нетрудно показать, все схемы примерно равноценны.

6. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Как уже было отмечено, вывод формул механических характеристик динамического торможения асинхронного двигателя мы будем вести по законам и формулам асинхронной машины, заменив постоянный ток, подаваемый в статор, на эквивалентный по м. д. с. трехфазный ток. Это допустимо. Действительно, в момент пуска двигателя вращающееся с синхронной частотой магнитное поле статора пересекает проводники неподвижного ротора; при динамическом торможении то же по форме поле неподвижно, но вращается ротор и при его синхронной частоте вращения происходит такое же пересечение поля проводниками ротора.

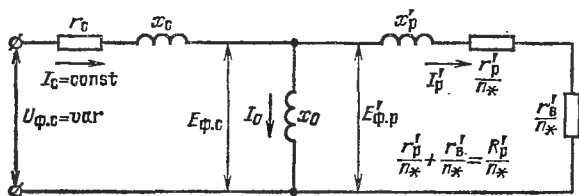


Рис. 3-28. Схема замещения асинхронного двигателя, находящегося в режиме динамического торможения.

Сравнимые режимы будут и при других частотах вращения ротора, считая численно равными скольжение в режиме двигателя и относительную частоту вращения в режиме динамического торможения.

Однако различие имеется, состоит оно в том, что в режиме асинхронной машины приложенное напряжение к статору неизменно и меняется ток статора, а в режиме динамического торможения дается любой желаемый неизменный ток статора, для чего переменное напряжение, приложенное к статору, должно рассматриваться меняющимся (рис. 3-28).

В основу расчета механических характеристик динамического торможения асинхронного двигателя положим три нижеприведенные зависимости, позволяющие учесть изменение магнитного потока по кривой намагничивания, изменение реакции ротора и изменение реактивного сопротивления ротора от частоты вращения:

$$I'_p = \frac{E'_{\phi.p}}{\sqrt{\left(\frac{R'_p}{n_*}\right)^2 + (x'_p)^2}} = \frac{E'_{\phi.p} n_*}{\sqrt{(R'_p)^2 + (x'_p n_*)^2}} = \frac{I_0 x_0 n_*}{\sqrt{(R'_p)^2 + (x'_p n_*)^2}}. \quad (3-66)$$
$$I_c^2 = (I_0 + I_p \sin \varphi_p)^2 + (I_p \cos \varphi_p)^2,$$
$$I_c^2 = I_0^2 + (I_p')^2 + 2I_0I_p' \sin \varphi_p. \quad (3-67)$$
$$M = 28,6 \frac{(I'_p)^2 R'_p}{n_c S}, \quad (3-68)$$

Рис. 3-29. Диаграмма токов статора, ротора и намагничивающего тока для асинхронного двигателя.

Заметим, что реактивное сопротивление цепи намагничивания, определяемое результирующим током двигателя, меняется при динамическом торможении, так как меняется ток намагничивания I_0 :

$$x_0 = E_{\Phi, c} / I_0. \quad (3-69)$$

Подставляя в (3-67) значение

$$\sin \varphi_p = \frac{x'_p n_*}{\sqrt{(R'_p)^2 + (x'_p n_*)^2}}$$

и значение I'_p из (3-66), получаем:

$$I_c^2 = I_0^2 + \frac{I_0^2 x_0^2 (n_*)^2}{(R'_p)^2 + (x'_p n_*)^2} + \frac{2 I_0^2 x_0 x'_p (n_*)^2}{(R'_p)^2 + (x'_p n_*)^2}, \quad (3-70)$$

откуда относительная частота вращения

$$n_* = R'_p \sqrt{\frac{\left(\frac{I_c}{I_0}\right)^2 - 1}{(x'_p + x_0)^2 - \left(\frac{I_c}{I_0}\right)^2 (x'_p)^2}}. \quad (3-71)$$

Из (3-70) определим I_0 и подставим в (3-66), тогда получим приведенный ток ротора

$$I'_p = \frac{I_c x_0}{\sqrt{\left(\frac{R'_p}{n_*}\right)^2 + (x'_p + x_0)^2}}. \quad (3-72)$$

Наконец, вводя в равенство (3-68) относительную частоту вращения $n_* = n/n_c$ вместо скольжения s (при динамическом торможении $n_* = \dot{s}$), получаем момент

$$M = \frac{28,6}{n_c} \frac{R'_p}{n_*} (I'_p)^2. \quad (3-73)$$

Эти три формулы (3-71) — (3-73) дают возможность рассчитать механическую характеристику асинхронного двигателя, зная данные двигателя, кривую намагничивания, постоянный ток возбуждения и сопротивления добавочных резисторов в роторе.

Расчет удобно вести с помощью вспомогательной табл. 3-4. Преобразуем несколько основные выражения. Из (3-71) найдем отношение, которое входит в последующие равенства:

$$\left(\frac{R'_p}{n_*}\right)^2 = \frac{(x_0 + x'_p)^2 - \left(\frac{I_c}{I_0}\right)^2 (x'_p)^2}{\left(\frac{I_c}{I_0}\right)^2 - 1}. \quad (3-74)$$

Для тока ротора оставим прежнее равенство

$$I'_p = \frac{I_c x_0}{\sqrt{\left(\frac{R'_p}{n_*}\right)^2 + (x_0 + x'_p)^2}}. \quad (3-75)$$

Определив из (3-74) и (3-75) (R'_p/n_*) и I'_p , окончательно найдем искомые данные:

ток ротора

$$I_p = I'_p \frac{1}{k_i},$$

или в относительных значениях

$$I_{p*} = \frac{I'_p}{I_{p.н}} \frac{1}{k_i}; \quad (3-76)$$

момент

$$M = \frac{28,6}{n_c} (I'_p)^2 \left(\frac{R'_p}{n_*} \right),$$

или в относительных значениях

$$M_* = \frac{28,6}{M_{нn_c}} (I'_p)^2 \left(\frac{R'_p}{n_*} \right); \quad (3-77)$$

частоту вращения

$$n_* = \frac{R'_p}{(R'_p/n_*)}. \quad (3-78)$$

Из (3-78) вытекает важное положение — при данном токе возбуждения и данном моменте относительная частота вращения пропорциональна полному активному сопротивлению цепи ротора.

Поясним последовательность расчета в табл. 3-4 для асинхронного двигателя типа МТ-31-6, 380 В, 11 кВт, 953 об/мин, ПВ = 25%, $I_{с.н} = 28,4$ А, $I_{с.х} = 19,2$ А, $E_{р.н} = 200$ В, $I_{р.н} = 35,4$ А, $r_c = 0,415$ Ом, $x_c = 0,465$ Ом, $r_p = 0,132$ Ом, $x_p = 0,27$ Ом, коэффициент трансформации напряжения $k_e = 1,84$, $m_c = m_p = 3$. Кратность максимального момента равна 3;1.

Ток возбуждения примем 3-кратным току холостого хода, т. е. $I_B = 3I_{с.х}$ и полное сопротивление цепей ротора $R_p = 0,1r_{р.н}$.

Столбцы 1 и 2. Данные берутся из кривой намагничивания рис. 3-24.

Столбец 3. Реактивное сопротивление цепи намагничивания есть $x_0 = E_{ф.с}/I_0$, но поскольку в столбцах 1 и 2 даны относительные значения I_{0*} и $E_{ф.с*}$, то x_0 найдется из

$$x_0 = \frac{E_{ф.с*}}{I_{0*}} \frac{E_{ф.с.х}}{I_{с.х}}.$$

Здесь $I_{с.х} = 19,2$ А — трехфазный ток статора холостого хода (номинальный намагничивания), принимаемый нами равным реактивной составляющей тока холостого хода; $E_{ф.с.х}$ — э. д. с. фазы статора при номинальном подведенном трехфазном напряжении при токе холостого хода:

$$E_{ф.с.х} = \frac{E_{р.н'}}{\sqrt{3}} k_e = \frac{200}{\sqrt{3}} 1,84 = 212 \text{ В.}$$

**Расчет механических характеристик динамического
торможения асинхронного двигателя**

Общие данные для любых постоянных токов возбуждения				Данные для принятого постоянного тока возбуждения $I_B = 3I_{c.x}$							
Кривая намагни- чивания		Вспомога- тельные расчеты		Вспомогательные расчеты					Искомые характеристики		
I_{0*}	$E_{ф.с*}$	x_0	$(x_0 + x'_p)^2$	$I_{c.x_0}$	$\left(\frac{I_c}{I_0}\right)^2$	$\left(\frac{R'_p}{n_*}\right)^2$	$\frac{R'_p}{n_*}$	I'_p	I_{p*}	M_*	n_*
0,2	0,26	14,4	235	677	150	0,732	0,856	44	2,29	0,43	1,29
0,4	0,52	14,35	233	674	37,5	5,52	2,35	43,7	2,27	1,16	0,471
0,6	0,736	13,55	210	637	16,7	12,5	3,54	42,7	2,22	1,67	0,313
0,8	0,895	12,4	177	582	9,4	20,15	4,49	41,4	2,154	2,00	0,247
1	1	11,05	143	519	6	27,6	5,25	39,9	2,075	2,17	0,211
1,2	1,07	9,85	116	462	4,17	35,5	5,96	37,5	1,95	2,18	0,186
1,4	1,122	8,87	95,8	416	3,06	45,2	6,72	35	1,82	2,13	0,165
1,6	1,163	8,04	80,3	377	2,34	58,4	7,64	32,1	1,67	2,04	0,145
1,8	1,196	7,34	68,2	344	1,85	78,4	8,85	28,4	1,477	1,85	0,125
2	1,223	6,76	59,0	317	1,5	115,5	10,75	24	1,25	1,60	0,103

Поэтому

$$x_0 = \frac{E_{ф.с*}}{I_{0*}} \frac{212}{19,2} = \frac{E_{ф.с*}}{I_{0*}} 11,05.$$

Столбец 4. Здесь значения x_0 берутся из столбца 3:

$$x'_p = x_p k_e^2 = 0,27 \cdot 1,84^2 = 0,92 \text{ Ом.}$$

Поэтому

$$(x_0 + x'_p)^2 = (x_0 + 0,92)^2.$$

Столбец 5. Эквивалентный по м. д. с. трехфазный ток I_c определится по принятому постоянному току возбуждения, который по условию примера принят 3-кратным току холостого хода, т. е.

$$I_B = 3I_{c.x} = 3 \cdot 19,2 = 57,5 \text{ А.}$$

Для схемы 1 включения фаз статора (табл. 3-3)

$$I_c = 0,816 I_B = 0,816 \cdot 57,5 = 46,9 \text{ А.}$$

Поэтому

$$\gamma_c x_0 = 46,9 x_0,$$

где значения x_0 берутся из столбца 3.

Столбец 6. Поскольку ток намагничивания I_0 в столбце 1 дан в относительных значениях, то и ток статора нужно выразить в относительных значениях к току холостого хода:

$$I_{c*} = \frac{I_c}{I_{c.x}} = \frac{46,9}{19,2} = 2,45.$$

Поэтому

$$\left(\frac{I_c}{I_0}\right)^2 = \left(\frac{2,45}{I_{0*}}\right)^2,$$

где значения I_{0*} берутся из столбца 1.

Столбцы 7, 9—12 рассчитываются соответственно по (3-74) — (3-78).

В (3-76) для приведения тока ротора к статору коэффициент трансформации тока при одинаковом числе фаз статора и ротора ($m_c = m_p$) равен обратному значению коэффициента трансформации напряжения. Поэтому в нашем случае

$$k_i = \frac{1}{k_e} = \frac{1}{1,84}$$

и (3-76) получит вид:

$$I_p = I'_p \cdot 1,84 \text{ или в относительных значениях } I_{p*} = \frac{I'_p}{35,4} \cdot 1,84 = 0,052 I_p.$$

В (3-78) для относительной частоты вращения нужно знать приведенное к статору полное активное сопротивление цепи ротора

$$R'_p = R_p \frac{m_c}{m_p} k_e^2.$$

По условию примера

$$R_p = 0,1 R_{p.н} = 0,1 \frac{E_{p.н}}{\sqrt{3} I_{p.н}} = 0,1 \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 35,4} = 0,327 \text{ Ом.}$$

Поэтому

$$R'_p = 0,327 \frac{3}{3} \cdot 1,84^2 = 1,108 \text{ Ом}$$

и выражение столбца 12 примет вид:

$$n_* = \frac{1,108}{(R'_p/n_*)},$$

где знаменатель берется из столбца 8.

7. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Расчет цепей динамического торможения проще всего производить путем выбора рациональной механической характеристики из семейства универсальных характеристик и определения по ней требуемого тока возбуждения и сопротивления добавочного резистора в цепи ротора.

Рассмотрим, какие механические характеристики являются наиболее желательными.

Как видно из рис. 3-27, удовлетворительные тормозные моменты для быстрой остановки привода можно получить при подаче постоянного тока возбуждения $I_b = 2 \div 3$

кратного трехфазному току холостого хода $I_{с.х.}$. Эти характеристики обеспечивают максимальные тормозные моменты от 1,25 до 2,2-кратных номинальному.

Из трех характеристик для каждого тока возбуждения в пределах 2—3-кратного неудовлетворительными являются характеристики, соответствующие полному активному сопротивлению цепи ротора $R_{p*} = 1$, так как они дают наименьшие тормозные моменты.

Характеристики при сопротивлениях цепи ротора $R_{p*} = 0,2$ и $0,4$ являются удовлетворительными, причем можно сказать, что характеристика $R_{p*} = 0,4$ даст меньший путь привода при торможении, чем характеристика $R_{p*} = 0,2$ потому, что при больших частотах вращения, при которых получается большой выбег по пути, в первом случае тормозной момент значительно больше, чем во втором.

Для получения количественной оценки в табл. 3-5 приведены результаты сравнительных расчетов времени торможения в секундах и пути торможения в оборотах двигателя при динамическом торможении с синхронной частоты вращения при постоянном токе возбуждения, 3-кратном трехфазному току холостого хода.

Таблица 3-5

Таблица сравнения времен и путей торможения

$$(I_B = 3I_{с.х.}, J_{мех} = 2J_{рот}, M_c = 0,1M_H)$$

Двигатель 30 кВт, 720 об/мин	Сопротивление цепи ротора	Время торможения, с	Путь торможения, обороты двигателя
С фазным ротором	$0,2R_{р.н}$	1,0	4,5
С фазным ротором	$0,4R_{р.н}$	1,2	4
С фазным ротором	$1R_{р.н}$	2,1	8,3
С короткозамкнутым ротором	Только внутреннее ротора	1,7	12

Рассмотрен двигатель краново-металлургического типа 30 кВт, 720 об/мин, ПВ = 25%, приводящий механизм (например, рольганг), имеющий момент инерции, приведенный к валу двигателя, равный 2-кратному моменту инерции ротора, и статический момент 0,1 номинального момента двигателя. Расчеты выполнены по формулам динамики привода и характеристикам рис. 3-27 и 3-51.

Таблица 3-5, рассчитанная для обычного реального случая, показывает, что сопротивления цепи ротора $R_{p*} = 0,2$ и $0,4$ обеспечивают вполне удовлетворительные вре-

мена, около 1 с, и пути, около 4 оборотов, тогда как сопротивление $R_{p*} = 1$ дает в 2 раза большие времена и пути торможения.

У двигателей с короткозамкнутым ротором тормозные моменты при высоких частотах вращения очень малы и потому путь при торможении получился очень большим (12 оборотов двигателя).

В тех случаях, когда требуется получить минимальный путь торможения, нужно брать $R_{p*} \approx 0,4$; когда же требуется минимальное время торможения, более удовлетворительным является $R_{p*} \approx 0,2$, если учитывать еще добавочно, что меньшее сопротивление цепи ротора дает меньший начальный тормозной момент, т. е. меньший удар в механических передачах.

Для приводов длительного режима (маховиковые ножницы, главные приводы клетей прокатных станков, двигатель-генераторы большой мощности) обычно требуется сократить время замедления до нескольких минут вместо десятков минут и часов при свободном выбеге. Сокращение времени замедления в этих случаях обычно требуется для того, чтобы за время стоянки стана между сменами или при изменении программы цеха успеть осмотреть подшипники, сменить валки, произвести ремонт и т. п. Здесь, чтобы снизить стоимость двигатель-генератора динамического торможения, оказываются приемлемыми механические характеристики, получаемые при малых токах возбуждения, порядка 1,5-кратного трехфазному току холостого хода. Исключение может составлять аварийное торможение, для которого могут потребоваться большие токи возбуждения, чтобы получить быстрое замедление.

Учитывая, что указанные приводы длительного режима останавливаются обычно без нагрузки, т. е. с ничтожно малым статическим моментом, желательно принимать сопротивление цепи ротора $R_{p*} = 0,2$, чтобы не было длительного выбега на низкой частоте вращения.

На основании характеристик рис. 3-27 и данных табл. 3-5 можно сделать еще один вывод, а именно: в схемах комбинированного торможения (противовключение при реверсах и динамическое торможение при остановках) или в схемах с предварительными ступенями пускового резистора следует при динамическом торможении закорачивать ступень противовключения и предварительные ступени и торможение осуществлять на сопротивлении пусковых ступеней.

Кроме того, желательно строить схемы так, чтобы сопротивление пусковых ступеней при динамическом торможении закорачивать по ступеням, как при пуске, используя для этого реле ускорения.

Пример 3-7. Рассчитать параметры цепей динамического торможения для двигателя типа МТ-21-6, 380 В, 5 кВт, 940 об/мин, ПВ = 25%, $E_{p.n} = 164$ В, $I_{p.n} = 20,6$ А, $I_{c.n} = 14,9$ А, $I_{c.x} = 10,9$ А, $r_c = 1,11$ Ом. Постоянный ток для возбуждения берется из сети 220 В. Двигатель управляется контактной панелью рис. 3-30, расположенной от двигателя на расстоянии 30 м. Требуется быстрое торможение.

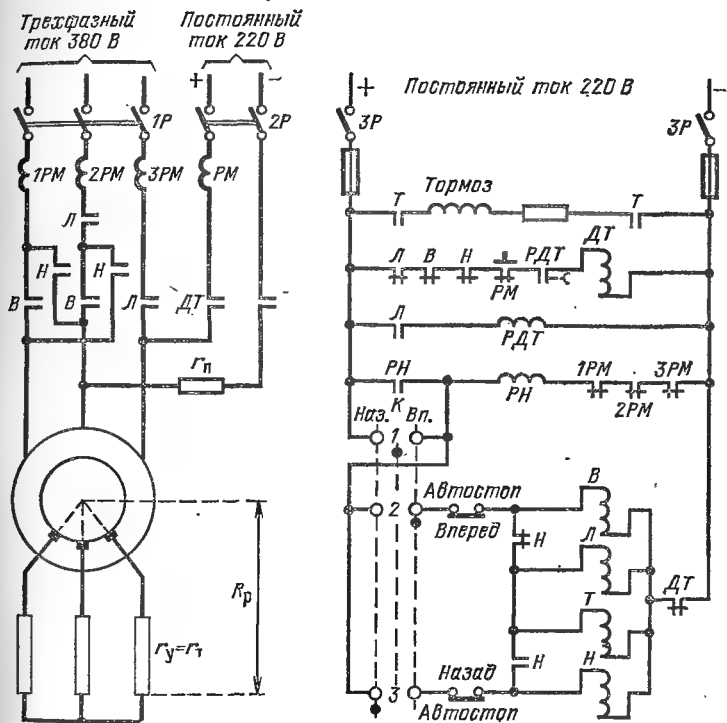


Рис. 3-30. Схема пуска и динамического торможения асинхронного двигателя.

Решение. Задача заключается в выборе механической характеристики двигателя, которая обеспечивала бы быстрое торможение, в определении сопротивления добавочного резистора в статоре для ограничения тока возбуждения до требуемого и в определении сопротивления добавочного резистора в роторе.

а) Расчет цепи возбуждения. Для получения максимального момента порядка 2-кратного номинальному току двига-

теля требуется согласно кривым рис. 3-27 ток возбуждения, 3-кратный трехфазному холостого хода, т. е. ток возбуждения должен быть:

$$I_{\text{в}} = 3I_{\text{с. х}} = 3 \cdot 10,9 \approx 33 \text{ А.}$$

Полное сопротивление цепи возбуждения

$$R = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{в}}} = \frac{220}{33} = 6,7 \text{ Ом.}$$

Это сопротивление состоит из сопротивлений последовательно соединенных двух фаз статора, добавочного резистора и питающих проводов. Сопротивление двух фаз статора

$$2r_{\text{с}} = 2 \cdot 1,11 \cdot 1,1 = 2,44 \text{ Ом}$$

(обмотки приняты теплыми с коэффициентом 1,1).

Сопротивление проводов сечением 10 мм²:

$$r_{\text{пров}} = \rho \frac{l}{s} = \frac{1}{57} \cdot \frac{2 \cdot 30}{10} = 0,1 \text{ Ом.}$$

Сопротивление проводов оказалось незначительным по сравнению с сопротивлением обмоток статора, и им можно было бы пренебречь. Однако для более крупных двигателей, притом если панель управления значительно удалена от двигателя, сопротивление проводов может играть некоторую роль в расчетах.

Искомое сопротивление добавочного резистора цепи возбуждения получится:

$$r_{\text{в}} = R - (2r_{\text{с}} + r_{\text{пр}}) = 6,7 - (2,44 + 0,1) = 4,16 \text{ Ом.}$$

б) Расчет цепи ротора. Как отмечалось выше (табл. 3-5), вполне удовлетворительными являются механические характеристики динамического торможения с полным сопротивлением цепи ротора $R_{\text{р}} = (0,2 \div 0,4) R_{\text{р. н}}$.

Схема рис. 3-30 выполняется так, что резистор динамического торможения в цепи ротора является одновременно и пусковым. Предположим, из условий пуска рассчитано сопротивление резистора ускорения $r_{\text{у}} \approx 0,2 R_{\text{р. н}}$. Это сопротивление является вполне подходящим и для динамического торможения, обеспечивая минимальное время замедления, и потому принимается нами как тормозное, т. е.

$$r_{\text{т}} = r_{\text{у}} = 0,2 R_{\text{р. н}} = 0,2 \frac{E_{\text{р. н}}}{\sqrt{3} I_{\text{р. н}}} = 0,2 \frac{164}{\sqrt{3} \cdot 20,6} = 0,92 \text{ Ом.}$$

В отдельных случаях можно просчитать по механической характеристике действительное время торможения привода по известным моменту инерции привода и статическому моменту. Это нетрудно сделать при помощи формул динамики привода § 1-1.

Пример 3-8. Выбрать генератор динамического торможения и рассчитать сопротивление резистора в цепи ротора для динамического торможения асинхронного двигателя, приводящего клеть прокатного стана с маховиком. Двигатель 850 кВт, 6000 В, 590 об/мин, $M_{\text{н}} = 13,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$, $I_{\text{с. х}} = 27,8 \text{ А}$, $r_{\text{с}} = 0,6 \text{ Ом}$. Суммарный момент инерции ротора и маховика $J = 12,5 \text{ т} \cdot \text{м}^2$. Статический момент холостого хода 1,4 кН·м. Двигатель управляется при помощи контакторного регулятора скольжения. Время торможения допускается около 2 мин.

Решение. а) Выбор генератора динамического торможения. Для остановки привода за 2 мин требуется средний тормозной момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{J n_{\text{н}}}{9,55 \Delta t} = \frac{12,5 \cdot 590}{9,55 \cdot 2 \cdot 60} = 6,4 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

От двигателя потребуется средний момент за вычетом статического момента, т. е. всего $6,4 - 1,4 = 5 \text{ кН} \cdot \text{м}$, что составляет:

$$\frac{5}{13,5} = 0,37 \text{ от } M_{\text{н}}.$$

Для получения этого среднего момента максимальный момент должен быть равным приблизительно 2-кратному, т. е. $2 \cdot 0,37 \approx 0,8$.

Постоянный ток возбуждения по кривой рис. 3-27 для получения такого максимального момента должен быть примерно 1,5-кратным трехфазному току холостого хода, т. е.

$$I_{\text{в}} = 1,5 I_{\text{с. х}} = 1,5 \cdot 27,8 = 42 \text{ А},$$

а напряжение генератора, чтобы протекал этот ток,

$$U_{\text{в}} = I_{\text{в}} \cdot 2r_{\text{с}} = 42 \cdot 2 \cdot 0,6 = 50 \text{ В}.$$

Выберем генератор динамического торможения из нормальной серии генераторов типа ПН на напряжение 115 В.

Тогда потребуется номинальная мощность

$$P_2 = \frac{I_{\text{в}} U_{\text{в}}}{1000} = \frac{42 \cdot 115}{1000} = 4,8 \text{ кВт}.$$

Принимаем генератор типа ПН-68, 115 В, 4,8 кВт, 1450 об/мин и к нему приводной двигатель типа А52-4, 380 В, 7 кВт, 1460 об/мин с короткозамкнутым ротором.

Имея запас по напряжению у генератора и по мощности у асинхронного двигателя, можно при надобности усилить эффект динамического торможения повышением напряжения сверх 50 В. Увеличение тока возбуждения генератора при этом сверх номинального тока статора можно допустить, если учесть кратковременный режим работы генератора около 2 мин.

б) Расчет цепи ротора. Специального расчета вести не требуется, так как для динамического торможения должно быть использовано сопротивление пускового резистора, рассчитанное из условия пуска.

Сопротивление цепи ротора желательно иметь, как указывалось, около 0,2 номинального, если строить схему так, чтобы сопротивление цепи оставалось неизменным во время торможения.

Как нетрудно видеть из характеристик рис. 3-27, при 1,5-кратном токе возбуждения время торможения можно сократить, если в начале торможения иметь сопротивление цепи ротора около номинального, а затем по мере снижения частоты вращения закорачивать ступени резистора, как и при пуске.

3-9. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

1. ОДНОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ПРИВОД

Простейшим способом регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором является регулирование последовательными ступенями резистора в ро-

торе, для чего могут быть использованы нормальные ступени пускового резистора. Получаемые при этом механические характеристики уже рассмотрены нами в § 3-3.

Таким способом регулирования широко пользуются для приводов передвижения моста и тележки кранов, а также для приводов подъема. Опускание малых грузов

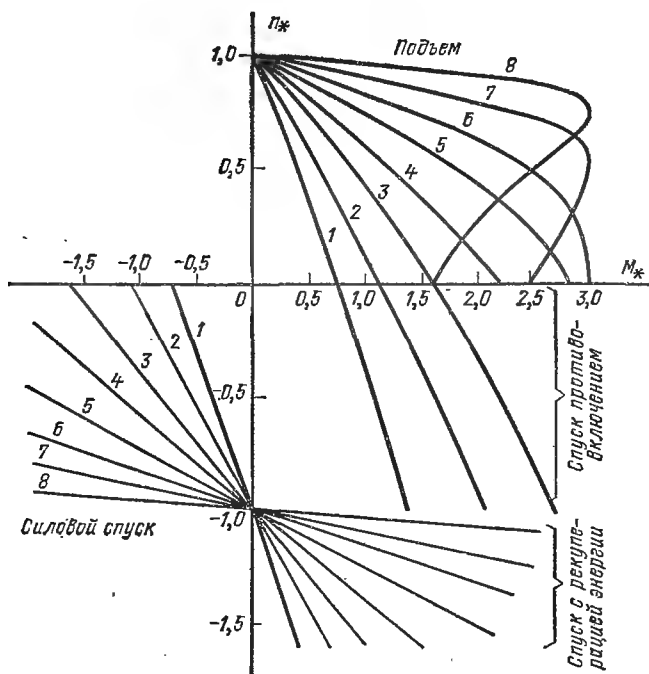


Рис. 3-31. Механические характеристики для асинхронного двигателя привода подъема крана, управляемого силовым контроллером типа КТ-3005 (см. схему рис. 3-18).

обычно производят на сверхсинхронной частоте вращения включением двигателя в направлении опускания, а больших грузов — на пониженной частоте вращения в режиме противовключения, т. е. включением двигателя на подъем с большим сопротивлением в цепи ротора. Схема такого управления показана на рис. 3-18, а соответствующие механические характеристики для управления приводом подъема силовым контроллером типа КТ-3005 — на рис. 3-31.

Наряду с хорошим качеством — простотой — это управление имеет недостаток: при подъеме, так же как и при передвижении, частота вращения привода сильно зависит от статического момента.

При спуске груза в режиме противовключения вследствие большой крутизны механических характеристик (на 1, 2 и 3-м положениях контроллера) частоты вращения спуска получаются очень неустойчивыми. Но характеристики спуска с рекуперацией энергии со сверхсинхронной частотой вращения являются вполне удовлетворительными.

Несмотря на недостатки, приведенная схема управления асинхронными двигателями является все же приемлемой для большинства нормальных мостовых кранов.

Для приводов подъема некоторых кранов требуются устойчивые высокие и низкие скорости для грузов различного веса. Такими кранами являются монтажные в сборочных цехах машиностроительных заводов, закалочные краны, колодцевые краны в цехе нагревательных колодцев блюминга. Например, для колодцевых кранов наряду с высокими скоростями опускания слитка в колодец и подъема слитка из колодца требуются еще низкие скорости при посадке слитка на дно колодца или в люльку слитковоза, а также при опускании пустых клещей для захвата слитка.

Для асинхронных двигателей пока еще не удастся получить просто и надежно такие характеристики медленного опускания, как для двигателей последовательного возбуждения постоянного тока, где (см. характеристики 1, 2, 3 спуска, рис. 2-61) пустой крюк или очень легкие грузы опускаются в режиме силового спуска, а тяжелые грузы благодаря свойствам характеристик автоматически переводят двигатель в тормозной режим при достаточно пологой электромеханической характеристике.

Здесь не будем рассматривать способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей подачей несимметричного напряжения к статору, а также схемы с регулируемыми реакторами в роторе, так как эти способы пока еще не доведены до состояния, оправдывающего широкое практическое применение.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей несимметричными сопротивлениями ступеней резистора в роторе является как описано в § 3-5, неудовлетворительным.

В ряде случаев бывает выгодно установить вместо одного большого двигателя два двигателя, каждый половинной мощности, механически связанные соединением валов или через зубчатые передачи, или через рельсы и ходовые колеса.

Двухдвигательный привод оправдывается обычно следующими соображениями. Бывает иногда легче разместить на механизме два двигателя меньшей мощности, чем один большой. В некоторых случаях применение двух двигателей меньшей мощности позволяет обеспечить однотипность двигателей и резерв. Для часто пускаемых механизмов двухдвигательный привод может иногда дать более быстрое ускорение и замедление, так как момент инерции двух двигателей обычно меньше, чем одного суммарной мощности.

Частоту вращения двухдвигательного привода можно регулировать так же, как и однодвигательного привода, изменением сопротивлений цепей роторов.

Необходимо обратить внимание, что при двухдвигательном приводе требуется еще предусмотреть меры для равномерного распределения нагрузок между двумя двигателями, так как небольшие различия в характеристиках двигателей могут вызвать недопустимые нарушения в распределении нагрузок. Равномерность распределения нагрузок достигается увеличением крутизны механической характеристики путем введения в ротор каждого двигателя постоянно включенной невыключаемой секции резистора с сопротивлением около $0,05 R_{p.n.}$ Улучшение распределения моментов при крутых механических характеристиках по сравнению с пологими легко показать графически, изобразив две пары характеристик с одинаковым относительным расхождением частот вращения двигателей.

Как видно из рис. 3-32, за счет увеличения крутизны двух механически связанных двигателей и понижения частоты вращения при номинальном моменте только на 5% (с 0,97 до 0,92) удалось получить значительно лучшее распределение моментов между двигателями, а именно вместо 2-кратного отличия (0,66 и 1,34) всего только на 20%, т. е. 0,9 и 1,1.

Сопротивления добавочных секций снижают частоту вращения привода и увеличивают потери электроэнергии. Для приводов кратковременного и повторно-кратковре-

менного режима эти недостатки несущественны, но при наличии этих секций резистора можно применить меньшее количество ступеней ускорения, благодаря чему постоянно включенные секции применяются при контакторном управлении нередко даже для однодвигательных приводов.

Двухдвигательный привод имеет преимущества перед однодвигательным по возможностям регулирования частоты

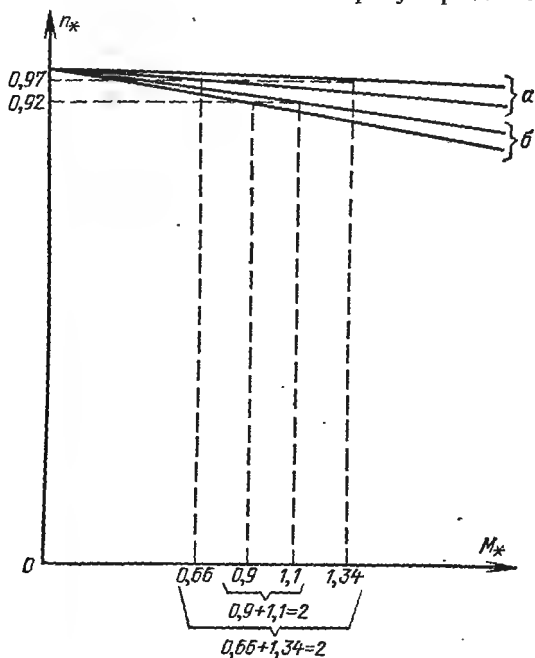


Рис. 3-32. Иллюстрация распределения моментов двух механически связанных асинхронных двигателей.

а — при естественных характеристиках — пологих;
б — при искусственных характеристиках — крутых.

вращения. На рис. 3-33 и 3-34 показано, как можно получить устойчивые частоты вращения двухдвигательного привода.

Характеристики рис. 3-33 соответствуют включению главного двигателя А с небольшим сопротивлением добавочного резистора в роторе — $0,3 R_{p.n}$ и включению вспомогательного двигателя Б в сеть в противоположном направлении с большим сопротивлением добавочного резистора — $0,9 R_{p.n}$. В направлении положительных частот вращения

(например, подъем груза) двигатель A работает в двигательном режиме, а B — в режиме противовключения с противоположно направленным моментом. В направлении отрицательных частот вращения (например, спуск груза) двигатель A работает в режиме противовключения и из его момента вычитается момент двигателя B , работающего в двигательном режиме.

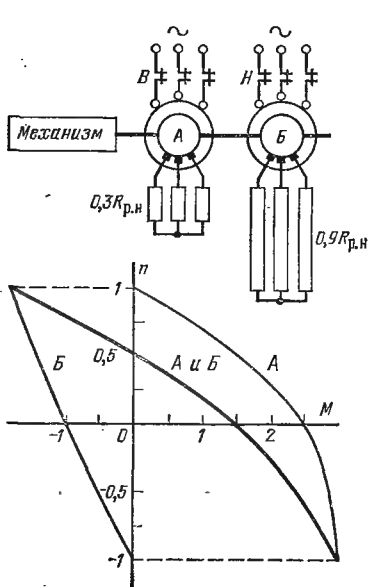


Рис. 3-33. Включение вспомогательного двигателя (B) против главного (A).

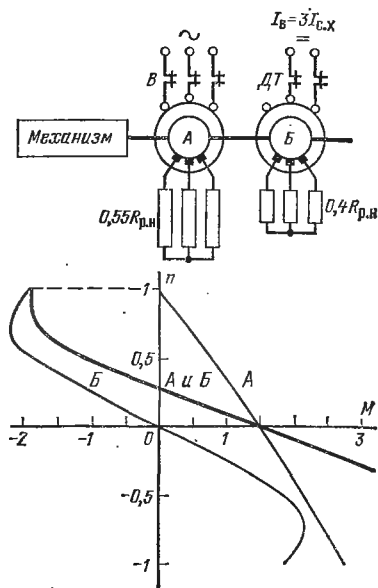


Рис. 3-34. Включение вспомогательного двигателя (B) на режим динамического торможения.

Механическая характеристика, обозначенная A и B , есть результирующая характеристика обоих двигателей, которая и будет определять состояние механизма. Эта характеристика, полагая во всех режимах, обеспечивает устойчивую частоту вращения $0,5 n_0$ при холостом ходе механизма.

Характеристики рис. 3-34 соответствуют включению главного двигателя A , определяющего направление вращения, в сеть с сопротивлением добавочного резистора в роторе $0,55 R_{p.n}$ и включению двигателя B по схеме динамического торможения с подачей постоянного тока возбуждения, 3-кратного трехфазному току холостого хода при сопро-

тивлении цепи ротора $0,4 R_{p.n.}$. В этом случае момент двигателя B только при положительных частотах вращения направлен против момента двигателя A , а при отрицательных частотах вращения согласен с ним и увеличивает тормозной момент. Схема регулирования частоты вращения переводом одного из двигателей в режим динамического торможения (рис. 3-34) имеет преимущества перед схемой включения двигателей в разные стороны (рис. 3-33) потому, что может дать более высокий результирующий пусковой момент.

Благодаря этому схема с применением динамического торможения позволяет получить пологие механические характеристики даже при очень малых частотах вращения.

Недостатком схемы с динамическим торможением является необходимость иметь постоянный ток.

Обе схемы имеют недостаток, заключающийся в больших потерях энергии; так, в схеме рис. 3-33 при статическом моменте, равном нулю, оба двигателя развивают противоположно направленные моменты, равные $1,5 M_n$, и потребляют из сети значительную энергию, которая гасится в резисторах, включенных в цепь ротора. Кроме того, при наличии двух двигателей можно получить пусковой момент, равный моменту только одного двигателя или меньший.

Приведенные способы регулирования частоты вращения применяются для некоторых специальных кранов, в частности для руднорейферных кранов на переменном токе.

3-10. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРИВОДАХ С МАХОВИКОМ

«Резисторы скольжения» применяются для маховиковых нерегулируемых приводов длительного режима с ударными кратковременными нагрузками. К таким приводам относятся ножницы и прессы со специальными муфтами, главные приводы ряда нереверсивных нерегулируемых прокатных станов, двигатели агрегатов Г — Д блюмингов и слябингов и др. Во время пиковых нагрузок благодаря резисторам скольжения в роторе снижается частота вращения двигателя и маховик отдает часть запасенной энергии, помогая этим двигателю; во время пауз привод ускоряется и маховик вновь заряжается.

При применении маховика и резистора скольжения можно установить двигатель меньшей мощности, выбрав его по нагреву, а не по пикам момента, и иметь меньшие толчки тока в сети, что бывает важным для не мощных питающих систем.

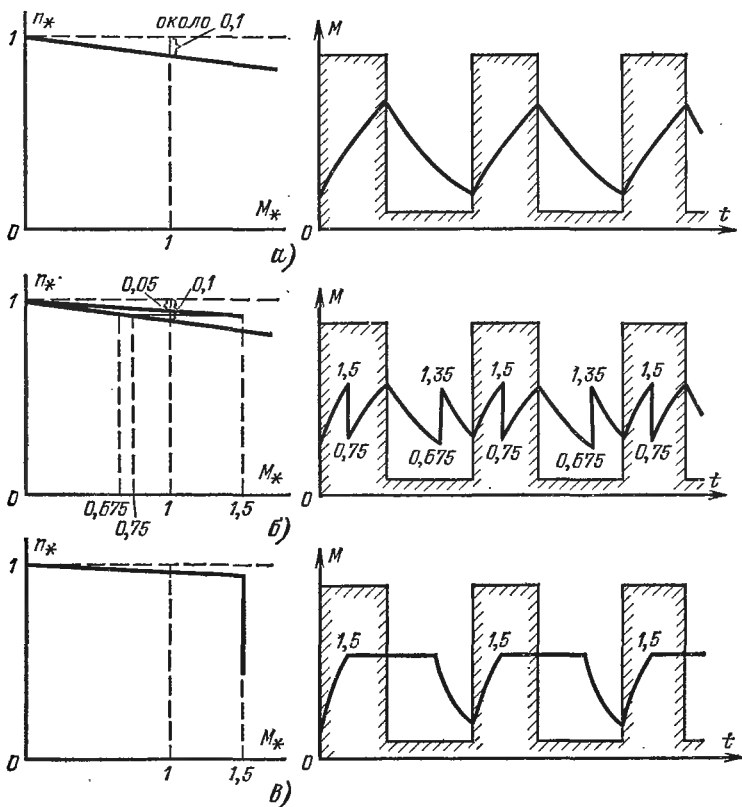


Рис. 3-35. Механические характеристики двигателя и диаграммы моментов во времени для трех способов введения резистора скольжения.

а — постоянно включенные секции резистора; б — контакторный регулятор скольжения; в — жидкостный регулятор скольжения.

Применяются три способа введения резисторов скольжения: постоянно включенные секции резистора, контакторный регулятор скольжения и жидкостный регулятор скольжения. На рис. 3-35 показаны механические характеристики и диаграммы изменения момента двигателя во времени для этих трех способов.

Постоянно включенные секции резистора (рис. 3-35, а) — это самый простой способ. Но он имеет недостаток, заключающийся в том, что рабочая механическая характеристика становится круче естественной начиная сразу с нуля момента. Поэтому получается ненужное снижение частоты вращения при небольших нагрузках, приводящее к потере производительности, добавочным потерям энергии и ослаблению эффективности маховика, так как он подходит к моменту перегрузки несколько разряженным. Постоянно включенные резисторы применяются для двигателей малой и средней мощности до 100—200 кВт.

Контакторный регулятор скольжения (рис. 3-35, б) основан на применении двух ступеней секций резистора, участвующих в работе: постоянно включенной ступени, сопротивление которой примерно вдвое меньше, чем по первому способу, и возвратной ступени, вводимой только при больших моментах нагрузки. Контакторные регуляторы скольжения изготавливаются на токи ротора до 1800 А, они выполняются с быстродействующими контакторами переменного тока и просты в эксплуатации.

Следующим шагом вперед является жидкостный регулятор скольжения (рис. 3-35, в), который при помощи моментного двигателя, перемещающего электроды, обеспечивает почти полное короткое замыкание колец ротора при статических моментах нагрузки, меньших предельно допустимого, а при больших вызывает снижение частоты вращения при постоянном моменте. Принцип этого способа является идеальным. Однако жидкостный регулятор скольжения имеет свои недостатки, вследствие которых он уступил место контакторному регулятору скольжения всюду, кроме области очень крупных двигателей (например, двигатели агрегатов Г — Д блюмингов и слябингов), для которых контакторы в роторных цепях получились бы невероятно большими. Основными недостатками жидкостного регулятора скольжения являются запаздывание, требование постоянного ухода за электролитом и за электродами, надобность в охлаждающей воде.

Мы не будем рассматривать дальше жидкостные регуляторы скольжения, так как они поставляются заводами как готовые аппараты комплектно с двигателями и, кроме того, о них имеется достаточно сведений в курсах по электроприводу. Ниже рассмотрим расчеты сопротивлений постоянно включенных секций резистора и сопротивлений контакторного регулятора скольжения.

Постоянно включенные секции резистора часто применяются для маховиковых ножниц прокатных станков, для прессов и т. п. Необходимо помнить, что сопротивление этих секций должно быть минимальным, чтобы не снижать производительности и не иметь лишних потерь.

При расчете требуемой мощности двигателя и выборе маховика расчетчиками электропривода задается искусственное скольжение двигателя $s_{н.и}$ при номинальном моменте двигателя.

Затем на основании того, что при номинальном моменте полное относительное сопротивление цепи ротора равно скольжению, определяются сопротивления постоянно включенных секций резистора

$$r_{пж} = s_{н.и} - r_{рж}. \quad (3-79)$$

Обычно принимается скольжение $s_{н.и} = 0,075 \div 0,1$, что дает падение частоты вращения примерно 15—20% при 2-кратных моментах двигателя. По принятому скольжению определяется момент инерции маховика.

Если же маховик выбран, то при помощи статических моментов нагрузки и момента инерции привода можно определить это скольжение, построив диаграмму момента двигателя по известной приближенной формуле, основанной на прямолинейной механической характеристике двигателя:

$$M = M_y (1 - e^{-t/T_{эм}}) + M_{нач} e^{-t/T_{эм}}, \quad (3-80)$$

где

$$T_{эм} = \frac{J n_c s_{н.и}}{9,55 M_n};$$

M — момент двигателя через время t в секундах, Н·м; M_y — установившийся момент, равный моменту нагрузки при прямоугольном графике момента, Н·м; $M_{нач}$ — начальный момент на данном участке графика, Н·м; M_n — номинальный момент двигателя, Н·м; $T_{эм}$ — электромеханическая постоянная времени, с; n_c — синхронная частота вращения двигателя, об/мин; J — момент инерции всего привода, кг·м².

Задавшись предположительно скольжением $s_{н.и}$, определяем по (3-80) моменты двигателя в концах времени действия нагрузки и концах пауз для ряда циклов, чтобы установился режим. При правильно предположенном сколь-

жении $S_{н.и}$ максимальные моменты двигателя в конце времени действия нагрузки должны быть равны примерно 2-кратным номинальному и не более чем 0,8—0,9 опрокидывающего момента, чтобы не иметь чрезмерно больших токов, не пропорциональных в этой области моментам.

Для маломощных приводов с ударной нагрузкой, например некоторых ножниц для резки холодных листов, иногда выгоднее применить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором немного большей мощности, используя скольжение только естественной характеристики, чем применять двигатель с фазным ротором с постоянно включенными секциями резистора.

2. КОНТАКТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР СКОЛЬЖЕНИЯ С СЕКЦИЯМИ РЕЗИСТОРА, СОЕДИНЕННЫМИ В ОДИНАРНУЮ ЗВЕЗДУ

Контакторные регуляторы скольжения иногда применяются для главных приводов прокатных станов средней и большой мощности.

Такие регуляторы скольжения изготавливаются комплектно со статорной аппаратурой 380 и 500 В для токов ротора от 240 до 600 А по схеме, приведенной на рис. 3-36. Аналогичные контакторные регуляторы скольжения изготавливаются для высоковольтных двигателей, но без статорной части, только роторные, с добавочной ступенью противовключения, на ток ротора до 900 А.

Эти регуляторы скольжения работают следующим образом (см. схему рис. 3-36 и характеристики на рис. 3-35 б). При увеличении момента двигателя свыше 1,5-кратного номинальному втянется реле скольжения РС и посредством промежуточных контакторов 1ПС—2ПС и контактора скольжения С введется добавочная ступень скольжения — сопротивление так называемой *возвратной ступени* r_c .

Далее будет идти снижение частоты вращения двигателя более интенсивно по более крутой характеристике, и маховик, разряжаясь, будет покрывать часть момента нагрузки.

При сбросе нагрузки двигатель вначале будет ускоряться по этой же крутой характеристике, при моменте $0,675 M_n$ выпадает реле РС, контактор С закоротит сопротивление возвратной ступени, двигатель перейдет на более пологую характеристику и вновь ускорит маховик до полной частоты вращения.

Применяемое реле скольжения типа РЭ-190 и схема имеют особенности, которые состоят в следующем:

1. Реле РС изготавливается трехкатушечным, чтобы оно не реагировало на изменение частоты ротора и четко работало при низких частотах. Реле является быстродействующим и имеет высокий коэффициент возврата — до 0,9 за счет большого магнитного зазора во втянутом положении и малого хода якоря.

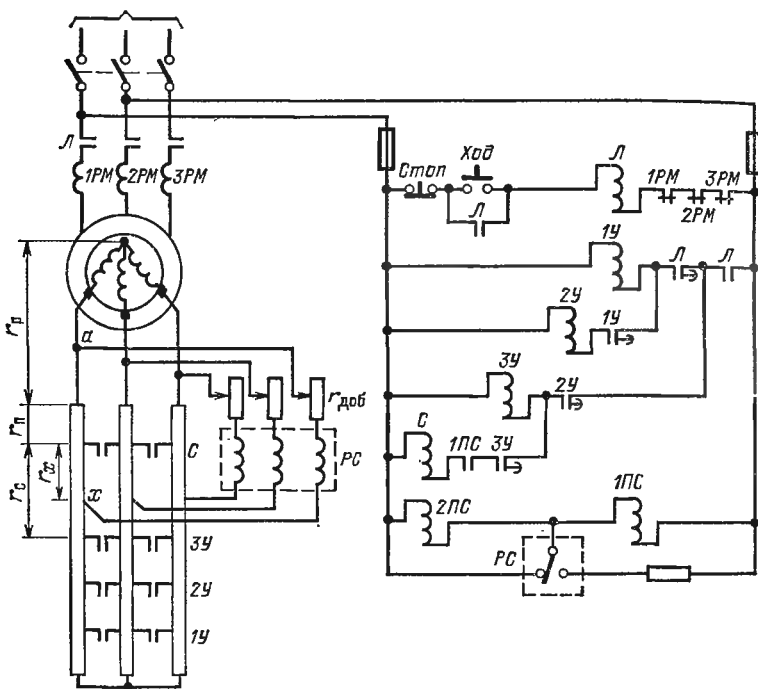


Рис. 3-36. Схема контакторного регулятора скольжения с секциями резистора, соединенными в одинарную звезду.

2. Для быстродействия введения и вывода добавочной ступени скольжения контакторы С и 1ПС — 2ПС применены с катушками переменного тока.

3. Для механически связанных по принципу коромысла промежуточных контактора 1ПС — 2ПС (когда один втянут, другой отпущен, и наоборот) с включенными особым образом катушками обеспечивают быстродействие срабатывания, безыскровую работу контактов реле РС и исклю-

чают ложную вибрацию контактора скольжения С. Контакт-
торы 1ПС — 2ПС переключаются только при замыкании
одного из контактов РС и остаются в прежнем положении
при размыкании контакта, что объясняется сильным
изменением полного сопротивления катушек переменного
тока в зависимости от положения якоря магнитной
системы.

Расчет контакторного регулятора скольжения включает
две задачи:

- а) расчет сопротивлений силовой цепи ротора;
- б) расчет уставок реле скольжения РС и данных
его цепей.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ СЕКЦИЙ РЕЗИСТОРА СИЛОВОЙ ЦЕПИ РОТОРА

Сопротивление r_n постоянно включенной секции обычно
принимается из расчета, чтобы вместе с внутренним сопро-
тивлением ротора r_p давать скольжение 0,05 при номиналь-
ном моменте, поэтому

$$r_{n*} = 0,05 - r_{p*}. \quad (3-81)$$

Сопротивление возвратной ступени принимается:

$$r_{с*} = 0,05. \quad (3-82)$$

В основе этой разбивки сопротивлений лежит макси-
мально допускаемое скольжение $s = 0,15$ при 1,5-кратном
моменте двигателя; при этом оба пика момента (рис. 3-35, б)
должны быть примерно одинаковыми.

Сопротивления r_n и r_c нужно считать «горячими»,
сопротивления, соответствующие «холодным» резисторам,
можно рекомендовать находить делением на коэффи-
циент 1,2.

Для принятых скольжений определяется момент инер-
ции маховика. Маховики обычно получаются такими, что
запас кинетической энергии при синхронной частоте вра-
щения (кВт·ч) численно для сортовых станков в 10—15,
а для листовых в 15—20 раз выше номинальной мощности
двигателя (кВт).

Сопротивления ступеней резистора ускорения рассчиты-
ваются согласно § 3-4; только при пользовании аналити-
ческими методами расчета нужно считать сопротивление
ротора $r_{p*} = 0,1$, учитывая постоянно включенную секцию
и возвратную ступень.

Для реле скольжения необходимо определить:

- 1) уставки тока втягивания и тока отпускания;
- 2) сопротивления секций добавочного резистора $r_{доб}$ в цепях катушек реле РС;

- 3) точки присоединения катушек реле РС к секциям резистора в роторе, т. е. сопротивление r_x .

Токи втягивания и отпускания реле выберем те, которые может хорошо обеспечить реле скольжения типа РЭ-190, независимо от данных роторной цепи двигателя, а затем рассчитаем сопротивления $r_{доб}$ и r_x , исходя из токов ротора.

Примем токи втягивания и отпускания реле:

$$I_{вт} = 4 \text{ А}; \quad I_{отп} = 3,4 \text{ А}. \quad (3-83)$$

Эти уставки тока хорошо выдерживаются реле РЭ-190 при положении регулировочного винта 13 мм, магнитном зазоре 8 мм при отпущенном якоре и 5 мм при втянутом якоре. Тогда коэффициент возврата реле будет $3,4/4 = 0,85$.

Сопротивление секции добавочного резистора $r_{доб}$ найдем из условий втягивания реле РС при принятой нами уставке 4А, когда возвратная ступень резистора закорочена и ток ротора равен 1,5-кратному номинальному $I_{р.н}$, т. е.

$$\frac{1,5I_{р.н}r_{п}}{r_{реле} + r_{доб}} = I_{вт}, \quad \text{откуда} \quad r_{доб} = 1,5 \frac{I_{р.н}}{I_{вт}} r_{п} - r_{реле}. \quad (3-84)$$

Подставив $I_{вт} = 4 \text{ А}$, $r_{реле} = 0,4 \text{ Ом}$, получим:

$$r_{доб} = \frac{1,5}{4} I_{р.н} r_{п} - 0,4. \quad (3-84')$$

Сопротивление r_x , определяющее точки присоединения катушек реле РС, найдем из условия отпускания реле при принятой нами уставке 3,4 А, когда сопротивление возвратной ступени резистора введено и ток ротора равен 0,675 номинального, т. е.

$$\frac{0,675I_{р.н}(r_{п} + r_x)}{r_{реле} + r_{доб}} = I_{отп},$$

откуда

$$r_x = \frac{I_{отп}}{0,675I_{р.н}} (r_{реле} + r_{доб}) - r_{п}. \quad (3-85)$$

Подставив $I_{отп} = 3,4 \text{ А}$, $r_{реле} = 0,4 \text{ Ом}$ и $r_{доб}$ из равенства (3-84'), после преобразований получим:

$$r_x = 0,89r_{п}. \quad (3-85')$$

3. КОНТАКТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР СКОЛЬЖЕНИЯ
С СЕКЦИЯМИ РЕЗИСТОРА, СОЕДИНЕННЫМИ
В ДВОЙНУЮ ЗВЕЗДУ

На рис. 3-37 показана схема, применяемая для высоко-
вольтных двигателей с большим роторным током — до
1800 А. В этой схеме контактор Π есть контактор противо-

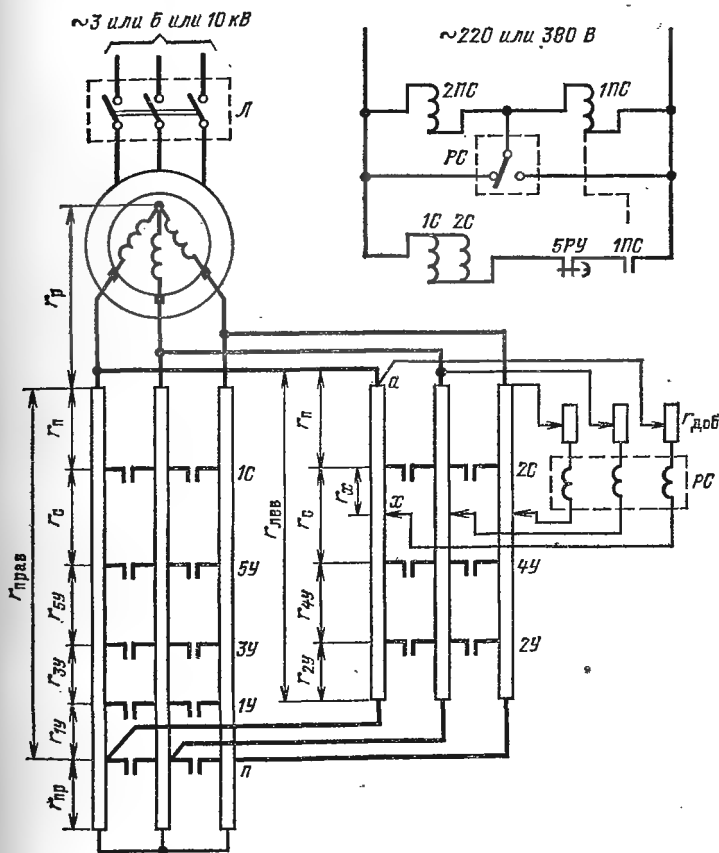


Рис. 3-37. Схема силовой цепи контактного регулятора скольжения с секциями резистора, соединенными в двойную звезду.

включения либо контактор предварительной ступени. Пуск двигателя осуществляется последовательным во времени замыканием масляного выключателя $\mathcal{L}$ и контакторов $1У \rightarrow 2У \rightarrow 3У \rightarrow 4У \rightarrow 5У \rightarrow 1С, 2С$.

Все сказанное выше по расчету постоянно включенных секций, сопротивления возвратной ступени и данных цепи реле скольжения PC для сопротивлений секций, соединенных в одинарную звезду, справедливо и для сопротивлений секций, соединенных в двойную звезду. Изменения будут лишь связанные с пересчетом на параллельное соединение. Поэтому приведенные выше (3-81) и (3-82) здесь будут иметь следующий вид:

$$r_{п*} = (0,05 - r_{р*}) \cdot 2; \quad (3-86)$$

$$r_{с*} = 0,1. \quad (3-87)$$

Из (3-84) получим:

$$r_{доб} = \frac{1,5}{2} \frac{I_{р.н}}{I_{вт}} r_{п} - r_{реле}. \quad (3-88)$$

Формула (3-85) останется без изменений:

$$r_x = \frac{I_{отп}}{0,675 I_{р.н}} (r_{реле} + r_{доб}) - r_{п}. \quad (3-89)$$

Считая для реле согласно (3-83) токи $I_{вт} = 4$ А и $I_{отп} = 3,4$ А, получаем:

$$r_{доб} = \frac{1,5}{8} I_{р.н} r_{п} - 0,4; \quad (3-88')$$

$$r_x = 0,89 r_{п}. \quad (3-89')$$

Способ расчета сопротивления секций пускового резистора, соединенного в двойную звезду, представлен ниже в виде примера, чтобы лучше отразить не только качественную сторону вопроса, но и количественную.

Пример 3-9. Рассчитать сопротивление резистора контакторного регулятора скольжения и данные цепей реле скольжения для асинхронного двигателя 1840 кВт, 6000 В, 415 об/мин, $E_{р.н} = 1020$ В, $I_{р.н} = 1150$ А, приводящего клеть прокатного стана с маховиком. Двигатель управляется при помощи контакторного регулятора скольжения по схеме рис. 3-37.

Решение. Внутреннее сопротивление цепи ротора

$$r_{р*} = s_n = \frac{430 - 415}{430} = 0,035.$$

Номинальное сопротивление

$$R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{\sqrt{3} I_{р.н}} = \frac{1020}{1,73 \cdot 1150} = 0,51 \text{ Ом.}$$

Далее по формулам (3-86) — (3-89) определяем:

$$r_{п*} = (0,05 - r_{p*}) \cdot 2 = (0,05 - 0,035) 2 = 0,03$$

или

$$r_{п} = 0,03 \cdot 0,51 = 0,0153 \text{ Ом};$$

$$r_{с*} = 0,1 \text{ или } r_{с} = 0,1 \cdot 0,51 = 0,051 \text{ Ом}.$$

Считая для реле скольжения ток втягивания 4 А и отпускания 3,4 А, получаем:

$$r_{доб} = \frac{1,5}{8} I_{р.н} r_{п} - 0,4 = \frac{1,5}{8} 1150 \cdot 0,0153 - 0,4 = 2,9 \text{ Ом};$$

$$r_x = 0,89 r_{п} = 0,89 \cdot 0,0153 = 0,0135 \text{ Ом}.$$

Сопротивление пусковых ступеней с предварительной ступенью считаем вначале, как для одинарной звезды. Эквивалентное одинарной звезде суммарное сопротивление ротора, постоянно включенных секций и возвратной ступени получается:

$$r_{p*} + 0,5 (r_{п*} + r_{с*}) = 0,035 + 0,5 (0,03 + 0,1) = 0,1 = s_{н. и}.$$

По схеме рис. 3-37 число ступеней ускорения $m = 5$ без предварительной.

Ускорение примем с пиками $M_{1*} = 1,5$, тогда отношение пиковых моментов к переключающим согласно (3-42) равно:

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s_{н. и} M_{1*}}} = \sqrt[5]{\frac{1}{0,1 \cdot 1,5}} = \sqrt[5]{6,67};$$

$$\lg \lambda = \frac{1}{5} \lg 6,67 = \frac{1}{5} 0,824 = 0,165; \lambda = 1,46.$$

Моменты переключения получим:

$$M_{2*} = \frac{M_{1*}}{\lambda} = \frac{1,5}{1,46} = 1,03.$$

Дальнейший расчет сопротивлений ступеней удобно вести при помощи вспомогательной табл. 3-6. В этой таблице столбец «полное сопротивление цепи ротора» рассчитывается и заполняется снизу вверх. Первая цифра 0,1 соответствует полному сопротивлению цепи ротора при замкнутом последнем контакторе ускорения 5У. Последующие полные сопротивления линии находятся умножением на $\lambda = 1,46$ по (3-44).

Полное сопротивление цепи ротора, включая предварительную ступень (закрыт Л), найдено путем удвоения полного сопротивления пусковых ступеней ($0,665 \cdot 2 = 1,33$), чтобы получить на предварительной ступени момент, половинный от пускового.

Для хорошей равномерности распределения токов в параллельных ветвях, что является важным условием для работы контакторов ускорения и для рационального выбора ящиков резисторов, следует принимать одинако-

Расчет сопротивлений секций резистора, соединенных в двойную звезду, по схеме рис. 3-37

Замкнуты контакты	Относительное полное сопроти- вление цепи ротора	Относительные сопротивления ветвей		Относительное сопротивле- ние ступени
		левая	правая	
<i>Л</i>	$0,665 \cdot 2 = 1,33$			
<i>Л, П</i>	0,665	$0,665 \cdot 2 = 1,33$	$0,665 \cdot 2 = 1,33$	$r_{\text{лр}} = 1,33 - 0,665 = 0,665$
<i>Л, П, 1У</i>	0,455	$\frac{1,33 \cdot 0,455}{1,33 - 0,455} = 0,69$	1,33	$r_{1у} = 1,33 - 0,69 = 0,64$
<i>Л, П, 1У, 2У</i>	0,312	0,69	$\frac{0,69 \cdot 0,312}{0,69 - 0,312} = 0,57$	$r_{2у} = 1,33 - 0,57 = 0,76$
<i>Л, П, 1У, 2У, 3У</i>	0,213	$\frac{0,57 \cdot 0,213}{0,57 - 0,213} = 0,34$	0,57	$r_{3у} = 0,69 - 0,34 = 0,35$
<i>Л, П, 1У, 2У, 3У, 4У</i>	0,146 (0,126) ¹	0,34	$\frac{0,34 \cdot 0,146}{0,34 - 0,146} = 0,256 (0,2)^1$	$r_{4у} = 0,57 - 0,2 = 0,37$
<i>Л, 4У, 5У</i>	0,1	$0,1 \cdot 2 = 0,2$	$0,1 \cdot 2 = 0,2$	$r_{5у} = 0,34 - 0,2 = 0,14$

¹ В скобках даны фактически принятые сопротивления взамен написанных рядом.² Расчет полных сопротивлений цепей ротора ведется снизу вверх, а сопротивлений ветвей и ступеней — сверху вниз.

выми полные сопротивления обеих ветвей. Вот почему сопротивление ветвей нужно рассчитывать, следуя по таблице сверху вниз. При закороченной предварительной ступени сопротивления обеих ветвей взяты равными удвоенному полному (т. е. $0,665 \cdot 2 = 1,33$).

Далее при закорачивании одной ступени ускорения приходится по известному полному сопротивлению цепи ротора и сопротивлению одной ветви определять сопротивление другой ветви. Если обозначить полное сопротивление цепи ротора R , а сопротивления ветвей A и B , то

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{A} + \frac{1}{B},$$

откуда найдется искомое сопротивление ветви

$$A = \frac{BR}{B - R}.$$

Передвигаясь по таблице вниз, мы, наконец, находим, что при закрытом контакторе $4U$ сопротивление правой ветви должно быть равным 0,256, а в действительности же оно равно 0,2, как проставлено рядом в скобках, так как в этой ветви закрыты уже все контакторы ускорения. На этом основании приходится вводить поправку в полное сопротивление цепи ротора. Это приведет к тому, что пики момента на последних ступенях ускорения будут несколько отличаться от расчетных. Чтобы этого не было, можно при надобности пики момента «подлечить» соответствующим подбором выдержек времени ускорения.

Б. ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Среди асинхронных двигателей двигатели с короткозамкнутым ротором являются преобладающими. В доменных цехах они применяются для электропущки, клапанов воздухонагревателей, на приводах погрузки кокса; в прокатных цехах — для транспортных рольгангов с групповым и одиночным приводом, упоров и т. п. Двигатели с короткозамкнутым ротором применяются для тельферов, кран-балок и тихоходных мостовых кранов. Они очень широко применяются для станков во всех отраслях промышленности.

Наконец, они, как уже отмечалось, монополюсно применяются для таких распространенных приводов, как транспортеры, вентиляторы и насосы малой мощности.

3-11. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь в зависимости от исполнения обмоток ротора различные пусковые и максимальные моменты, различные пусковые токи статора и различные скольжения. На рис. 3-38 приведены естественные характеристики двигателей для основных видов исполнения ротора. Рассмотрим эти исполнения.

Двигатели типа А2 общего применения до 100 кВт, до 500 В. Обмотка ротора с глубоким пазом выполняется литьем из алюминиевого сплава.

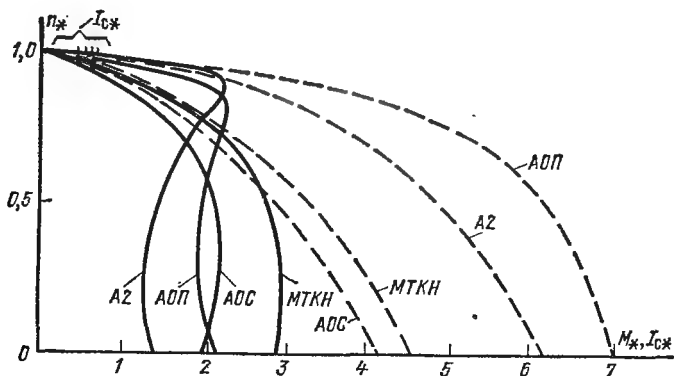


Рис. 3-38. Механические характеристики (сплошные) и характеристики тока статора (пунктирные) для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

А2 — общего применения; АОП — с повышенным пусковым моментом; АОС — с повышенным скольжением; МТКН — краново-металлургические.

Как видно из рис. 3-38, отражающего средние данные, эти двигатели дают самые низкие пусковой (1,0—1,8) и максимальный (1,7—2,2) моменты, большой пусковой ток (6,5) и малое номинальное скольжение (0,02—0,03). Поэтому они применяются для приводов длительного режима, не требующих больших пусковых моментов, например для вентиляторов, насосов, компрессоров, станков и т. п.

Двигатели типа АОП с повышенным пусковым моментом изготавливаются до 100 кВт, до 500 В. Роторы этих двигателей имеют двойную клетку. Обмотки выполняются литьем из алюминиевых сплавов.

Эти двигатели имеют большие пусковой (1,7—1,9) и максимальный (2,2—3,3) моменты, самый большой пусковой ток (6—7,5) и малое скольжение (0,03). Их также применяют для механизмов длительного режима, которые обладают большим статическим моментом трогания, например дробилки, мельницы, глиномялки, плунжерные насосы и др.

Двигатели типа АОС с повышенным скольжением изготавливаются до 100 кВт до 500 В. Ротор выполняется с глубоким пазом, но менее глубоким, чем в двигателях типа А2. Обмотка из алюминиевого сплава повышенного сопротивления, заливаемого в пазы под давлением.

Эти двигатели имеют еще более высокие пусковой (1,7—2,2) и максимальный (1,7—3,7) моменты, меньший пусковой ток (3,5—7,0) и очень большое номинальное скольжение (0,1—0,16).

Вследствие больших скольжений и низкого к. п. д. эти двигатели не следует применять для длительного режима работы с равномерной нагрузкой. Они предназначены для длительного вращения с ударной нагрузкой (молоты, прессы, ножницы) или пульсирующей нагрузкой (небольшие поршневые компрессоры). Они очень хороши для кратковременного режима — там, где может потребоваться от двигателя преодоление больших моментов трогания, например для задвижек, шиберов и т. п.

Двигатели типа МТКН краново-металлургические до 45 кВт, 220/380 и 500 В рассчитаны для повторно-кратковременного режима работы с частыми пусками. Поэтому они имеют повышенный пусковой момент (2,1—3,1) и сравнительно небольшой пусковой ток (2,6—5,0) за счет увеличенного сопротивления стержней ротора. Повышенное скольжение (0,03—0,11) для этих двигателей не является существенным недостатком, так как они не применяются для длительного режима. Ротор залит алюминиевым сплавом АМ повышенного удельного сопротивления.

Двигатели 13-го и 15-го габаритов единой серии А2 мощностью 200—1250 кВт высокого напряжения 6000 и 3000 В имеют почти такие же кратности пускового и критического моментов, пускового тока и номинальные скольжения, как и двигатели типа А2 меньших габаритов. Обмотка ротора выполнена из прямоугольных алюминиевых шин. Они продолжают серию А2 по мощности и по напряжению и применяются также для длительного режима работы.

Рассмотрим системы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

В некоторых случаях для крупных двигателей требуется ограничить пусковой ток до допустимого для питающей системы. Иногда требуется уменьшить пусковой момент двигателей, даже небольших, для того чтобы смягчить удары в передачах и обеспечить плавное ускорение.

Необходимо обратить внимание на то, что ограничение тока и момента двигателей получается за счет усложнения схемы управления и удорожания установки, а потому должно применяться только там, где это обосновано.

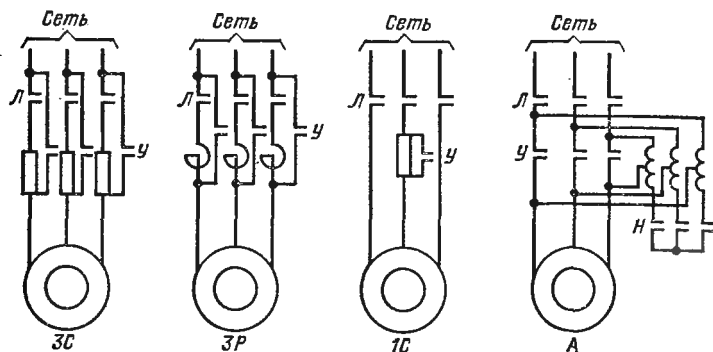


Рис. 3-39. Способы ограничения тока и момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

ЗС — три секции резистора (включение Л, время, включение У, отключение Л); ЗР — три реактора; 1С — одна секция резистора; А — автотрансформатор (включение Н, включение Л, время, отключение Н, включение У).

На рис. 3-39 показаны различные практические способы ограничения пускового тока и момента. Каждый из этих способов имеет свою область применения, которую нетрудно определить из рассмотрения характеристик на рис. 3-40 и 3-41, рассчитанных для краново-металлургического двигателя типа МТК-42-8, 380 В, 16 кВт, 685 об/мин.

В расчетах были приняты такие активные сопротивления при способах ЗС и 1С, реактивные сопротивления при способе ЗР и коэффициент трансформации при способе А, при которых двигатель дает одинаковый пусковой пониженный момент (в данном случае 1,5 номинального вместо естественного 3-кратного).

По механическим свойствам наиболее благоприятной является характеристика А (рис. 3-40), так как она дает наименьший рост момента при ускорении двигателя.

Рост момента при увеличении частоты вращения двигателя в схемах $3C$, $3P$ и $1C$ объясняется повышением напряжения на обмотках статора вследствие снижения потерь напряжения в пусковых резисторах или реакторах при спадаании тока.

Недостатком механической характеристики A может являться в некоторых случаях сильное падение момента при дальнейшем увеличении частоты вращения, в результате чего, например, при статическом моменте, равном

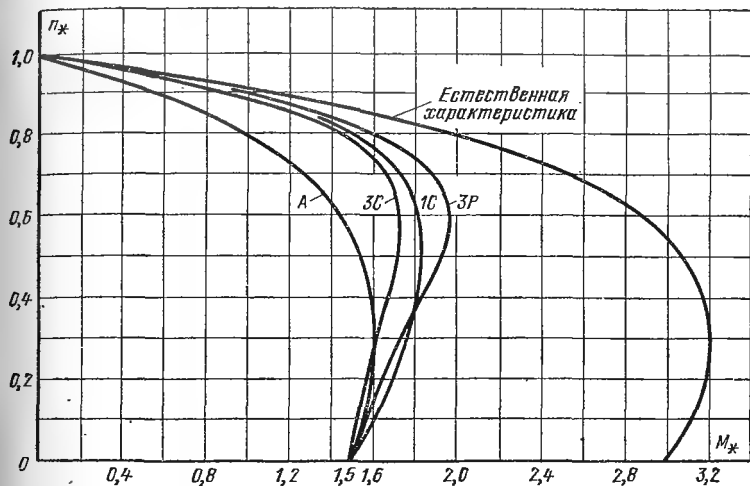


Рис. 3-40. Механические характеристики асинхронного двигателя МТК для схем рис. 3-39.

номинальному двигателю, пик момента при переходе на естественную характеристику получится 2-кратным, тогда как при переходе с характеристик $3C$, $1C$, $3P$ — всего около номинального.

В обоих случаях все приведенные способы ограничения момента являются удовлетворительными. Область применения приведенных способов определяется главным образом различиями в пусковых токах и стоимостью электрооборудования.

Обращаясь к кривым тока, забираемого из сети (рис. 3-41), мы видим, что способ пуска с резистором в одной линии статора ($1C$) почти не дает уменьшения пускового тока в цепях статора, в которые не включены резисторы.

Пуск через симметричные секции резистора и через реакторы (ЗС и ЗР) дает одинаковые снижения пускового тока, притом пусковой момент уменьшается в квадрате по сравнению с током. Другими словами, пусковой ток снижается не так, как пусковой момент, а в значительно меньшей степени.

Весьма благоприятными свойствами по забираемому току из сети обладает автотрансформаторный пуск (А). Хотя через статор проходит тот же начальный пусковой ток (пунктирная кривая А'), что и при реакторном пуске

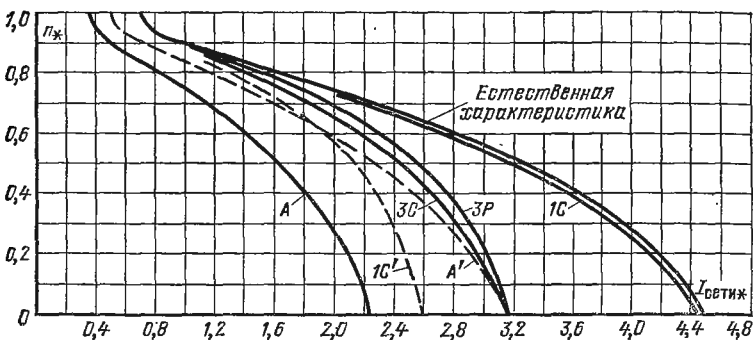


Рис. 3-41. Характеристика тока, забираемого из сети, для условий рис. 3-40.

Дополнительные пунктирные кривые: А' — ток в линиях статора при включении через автотрансформатор; 1С' — ток в одной линии статора, в которую включен один резистор.

или пуске через симметричные секции резистора, из сети забирается ток значительно меньший, а именно: пусковой ток уменьшается во столько же раз, во сколько и пусковой момент. Здесь пусковой ток, забираемый из сети, уменьшается за счет трансформации напряжений с большего на меньшее, тогда как в схемах с резисторами и реакторами ток сети равен току двигателя.

Теперь перейдем к рекомендациям. Если требуется понизить пусковой момент и нет ограничений по току, например, для двигателей небольшой и средней мощности, применяемых для станков, для крановых и транспортных механизмов, нужно применять способ ограничения момента с резистором в одной цепи статора (1С) как самый простой и дешевый, обеспечивающий необходимые условия.

Если требуется ограничение тока и двигатель пускается с малой нагрузкой или вхолостую, например двигатели большой мощности, приводящие генераторы преобразовательных агрегатов и т. п., то нужно, как правило, применять пуск через симметричные секции резистора ($3C$) для низковольтных двигателей и через реакторы ($3P$) для высоковольтных. Можно и высоковольтные двигатели пускать через резисторы, но тогда ящики резисторов должны быть установлены на высоковольтных изоляторах и применены высоковольтные резисторы. Пуск через автотрансформатор (A) обходится очень дорого и потому может применяться только в тех крайних случаях, когда для обеспечения необходимого минимального пускового момента пуск с симметричными секциями резистора или реакторный пуск не могут дать нужного снижения пускового тока для питающей системы.

Заметим, что автотрансформаторный пуск и реакторный, оправдываемые только для крупных высоковольтных двигателей, находят применение главным образом для синхронных двигателей, которые почти повсеместно вытеснили асинхронные двигатели в установках большой мощности.

3-12. ПУСК С СИММЕТРИЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ СЕКЦИЙ РЕЗИСТОРА В СТАТОРЕ

Покажем, как рассчитать характеристики, приведенные на рис. 3-40 и 3-41, а также как рассчитать активные и реактивные сопротивления цепей статора, чтобы получить заданные пусковой ток и пусковой момент.

1. РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотрим два способа расчета искусственных механических характеристик: 1) построением круговой диаграммы и 2) пересчетом известных естественных характеристик.

Первый способ удобен тем, что можно произвести расчет, имея небольшое количество опытных или каталожных данных, и определить не только механическую характеристику, но и характеристики тока статора, тока ротора, подводенной мощности, полезной мощности, коэффициента мощности.

Второй способ очень прост и применим для двигателей всех исполнений (нормальных, глубокопазных и двух-

в) Из конца вектора $I_{c.x}$ проводим луч AD центра круга под углом α к горизонтали из условия

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{r_c}{x_x},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{\frac{x_x}{r_c} - \frac{r_c}{x_x}}, \quad (3-90)$$

где $x_x = x_c + x_0$ — реактивное сопротивление холостого хода, состоящее из реактивных сопротивлений фазы статора x_c и намагничивания x_0 . Сопротивление x_x определится:

$$x_x = \frac{U_{\phi.c}}{I_{c.x}}. \quad (3-91)$$

г) Соединяем прямой точки A и B концов векторов и из середины (точка T) проводим перпендикуляр до луча AD . Получим центр круга в точке O_1 .

Центр O_1 круга можно определить более точно по диаметру круга

$$D = \frac{U_{\phi.c}}{x_k + \frac{r_c^2}{x_0}}, \quad (3-92)$$

откладывая его на луче AD от точки A .

Здесь x_k — реактивное сопротивление короткого замыкания,

$$x_k = x_c \sigma_c + x'_p \sigma_c^2. \quad (3-93)$$

Коэффициент σ_c представляет собой отношение напряжения $U_{\phi.c}$, подводимого к фазе статора, к э. д. с. $E_{\phi.c}$:

$$\sigma_c = \frac{1}{x_{\phi}} \sqrt{r_c^2 + x_x^2}, \quad (3-94)$$

где

$$x_0 = x_x - x_c.$$

Значение x_x определяется из (3-91).

При наличии данных $I_{c.k}$, $\cos \varphi_{c.k}$ проще найти искомое x_k для определения по формуле (3-92) диаметра круга:

$$x_k = \frac{U_{\phi.c}}{I_{c.k}} \sin \varphi_{c.k}. \quad (3-95)$$

д) Из центра O_1 проводим окружность через точки A и B , т. е. через концы векторов $I_{c.x}$ и $I_{c.k}$.

е) Для определения линии момента двигателя опускаем из точки B перпендикуляр BE на луч AD центра круга. Перпендикуляр BE делим на две части в отношении

$$r'_p \sigma_c^2 : r_c. \quad (3-96)$$

Прямая AK будет линией момента. Для любого тока статора I_c , например с точкой C на круге, мы получим ток ротора I'_p , угол сдвига фаз статора φ_c .

Момент M получим на перпендикуляре из точки C на луч AD , отсчитывая до линии момента AK .

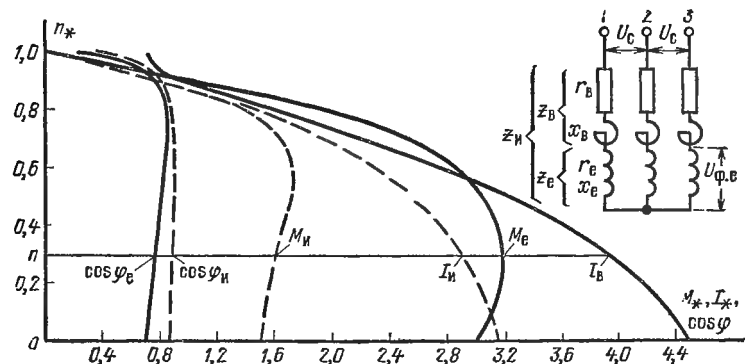


Рис. 3-43. Характеристики асинхронного двигателя МТК-41-8, 11 кВт, 685 об/мин, ПВ=25%: естественные (сплошные) и искусственные (пунктирные) при сопротивлении секций резистора r_b в трех цепях статора ($x_b = 0$).

Масштаб момента M определится по известному номинальному моменту двигателя, построенному для номинального тока статора, или по максимальному или пусковому моменту.

Частоту вращения n получим на линии частоты вращения в точке пересечения луча вектора тока ротора I'_p .

Линия частоты вращения, как известно, строится параллельно линии момента M на произвольном расстоянии. Частота вращения $n = 0$ проставляется в точке пересечения луча AB (на продолжении вектора тока ротора короткого замыкания), а $n = 1$ — в точке пересечения перпендикуляра к лучу центра круга AD , проведенному из конца вектора тока холостого тока.

Из приведенных построений на рис. 3-42 видно, что точная круговая диаграмма отличается от широко применявшихся приближенных диаграмм поворотом луча центра

круга на угол α и направлением линии момента, которое получается делением отрезка BE в отношении $r'_p \sigma_c^2 : r_c$ вместо $r'_p : r_c$.

Для двигателей, имеющих относительно большое активное сопротивление статора (двигателей типов МТ, МТК, АС и др.), следует пользоваться только точной круговой диаграммой. Точной круговой диаграммой нужно также пользоваться во всех случаях, когда вводятся в цепь статора внешние активные или реактивные сопротивления.

Теперь перейдем к построению точной круговой диаграммы для случая, когда во все три цепи статора включены одинаковые внешние сопротивления.

Рассмотрим общий случай, когда внешнее сопротивление состоит из активного сопротивления $r_{\text{в}}$ и реактивного $x_{\text{в}}$ (см. схему рис. 3-43).

Найдем предварительно внутренние сопротивления двигателя (статор — ротор) для режима холостого хода

$$r_x = \frac{U_{\text{ф.с}}}{I_{\text{с.х}}} \cos \varphi_{\text{с.х}}; \quad x_x = \frac{U_{\text{ф.с}}}{I_{\text{с.х}}} \sin \varphi_{\text{с.х}} \quad (3-97)$$

и для режима короткого замыкания

$$r_k = \frac{U_{\text{ф.с.е}}}{I_{\text{с.к}}} \cos \varphi_{\text{с.к}}; \quad x_k = \frac{U_{\text{ф.с.е}}}{I_{\text{с.к}}} \sin \varphi_{\text{с.к}} \quad (3-98)$$

При наличии внешних сопротивлений получим для режима холостого хода

$$R_x = r_x + r_{\text{в}}; \quad X_x = x_x + x_{\text{в}}; \quad z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2};$$

$$I_x = \frac{U_{\text{ф.с.е}}}{z_x}; \quad \cos \varphi_x = \frac{R_x}{z_x} \quad (3-99)$$

и для режима короткого замыкания

$$R_k = r_k + r_{\text{в}}; \quad X_k = x_k + x_{\text{в}}; \quad z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2};$$

$$I_k = \frac{U_{\text{ф.с.е}}}{z_k}; \quad \cos \varphi_k = \frac{R_k}{z_k} \quad (3-100)$$

(здесь индекс «е» — естественное).

Направление луча AD , проведенного через центр круга определится (3-90):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{\frac{x_x + x_{\text{в}}}{r_{\text{с}} + r_{\text{в}}} - \frac{r_{\text{с}} + r_{\text{в}}}{x_x + x_{\text{в}}}} \quad (3-101)$$

Центр круга O_1 находим, соединяя прямой концы векторов токов I_x и I_k и проводя перпендикуляр из середины

этой прямой до пересечения с лучом центра круга. Желательно проверить полученный диаметр круга по формуле [см. (3-92)]

$$D = \frac{U_{\text{ф.с.е}}}{(x_{\text{к}} + x_{\text{в}}) + \frac{(r_{\text{с}} + r_{\text{в}})^2}{x_0}} \quad (3-102)$$

Линия момента найдется делением перпендикуляра, опущенного на луч центра круга из конца вектора тока короткого замыкания, в отношении (3-96)

$$r'_\text{с} \sigma_{\text{с}}^3 : (r_{\text{с}} + r_{\text{в}}), \quad (3-103)$$

где согласно (3-94)

$$\sigma_{\text{с}} = \frac{1}{x_0} \sqrt{(r_{\text{с}} + r_{\text{в}})^2 + (x_{\text{х}} + x_{\text{в}})^2}. \quad (3-104)$$

Так, мы получили все данные для построения круговой диаграммы. Если внешнее сопротивление чисто активное, то в приведенных выше выражениях (3-99) — (3-104) нужно считать $x_{\text{в}} = 0$. В случае применения реакторов значение $r_{\text{в}}$ должно остаться, так как реактор имеет внутреннее активное сопротивление, и лишь в приближенных расчетах можно считать $r_{\text{в}} = 0$.

Круговая диаграмма рис. 3-42 охватывает двигательный режим (по кругу $A - C - B$), режим противовключения ($B - K$) и генераторный рекуперативный ($A - C' - K$).

Круговая диаграмма может применяться для двигателей типов МТК и АС. Рассмотренная круговая диаграмма может применяться и для глубокопазных двигателей с однородными стержнями высокого сопротивления, например для двигателей типа А.

2) Пересчет известных естественных характеристик. Пусть мы имеем естественные характеристики момента $M_{\text{е}}$, тока статора $I_{\text{с.е}}$ и коэффициента мощности статора $\cos \varphi_{\text{с.е}}$ в зависимости от частоты вращения ротора n (или скольжения s), как показано на рис. 3-43.

Рассмотрим опять общий случай, когда внешнее сопротивление $z_{\text{в}}$ состоит из активного сопротивления $r_{\text{в}}$ и реактивного $x_{\text{в}}$.

Найдем для частоты вращения n искусственные $M_{\text{и}}$, $I_{\text{с.и}}$ и $\cos \varphi_{\text{с.и}}$.

Определим вначале для данной частоты вращения n естественные сопротивления:

$$z_{\text{е}} = \frac{U_{\text{ф.с.е}}}{I_{\text{с.е}}}; \quad r_{\text{е}} = z_{\text{е}} \cos \varphi_{\text{с.е}}; \quad x_{\text{е}} = z_{\text{е}} \sin \varphi_{\text{с.е}}. \quad (3-105)$$

При наличии внешних сопротивлений в линиях статора получим сопротивления искусственных характеристик:

$$R_{и} = r_e + r_{в}; \quad X_{и} = x_e + x_{в}; \quad z_{и} = \sqrt{R_{и}^2 + X_{и}^2}. \quad (3-106)$$

Наконец, получим искомые величины:

$$\left. \begin{aligned} I_{с. и} &= \frac{U_{\Phi. с. е}}{z_{и}}; \\ \cos \varphi_{с. и} &= \frac{R_{и}}{z_{и}}; \\ M_{и} &= M_e \frac{I_{с. и}^2}{I_{с. е}^2} = M_e \frac{z_e^2}{z_{и}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3-107)$$

Здесь выражение для искусственного момента найдено из соотношения

$$\frac{M_{и}}{M_e} = \frac{U_{\Phi. с. и}^2}{U_{\Phi. с. е}^2} = \frac{(I_{с. и} z_e)^2}{(I_{с. е} z_e)^2} = \frac{I_{с. и}^2}{I_{с. е}^2}.$$

Если применяются добавочные резисторы, то в (3-106) можно считать $x_{в} = 0$, а при реакторах — $r_{в} = 0$ в приближенных расчетах. Этим способом рассчитаны построенные на рис. 3-40 и 3-41 характеристики для симметричных сопротивлений секций резистора (ЗС) и реакторов (ЗР).

2. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУСКОВОГО РЕЗИСТОРА ИЛИ РЕАКТОРА

Требуется рассчитать сопротивление пускового резистора или реактора так, чтобы искусственный пусковой ток составлял часть a от естественного пускового тока:

$$I_{и. п} = a I_{е. п}$$

или искусственный пусковой момент — часть μ от естественного пускового момента:

$$M_{и. п} = \mu M_{е. п}.$$

Вследствие того что момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, нетрудно показать, что

$$\mu = a^2, \quad (3-108)$$

т. е. если, например, искусственный пусковой ток составляет 0,5 естественного, то искусственный пусковой момент составит всего 0,25 естественного.

Для получения части a естественного пускового тока необходимо иметь полное пусковое сопротивление линии двигателя

$$z_{и.п} = \frac{z_K}{a}.$$

Обращаясь к графическим построениям рис. 3-44, получаем требуемое внешнее активное сопротивление

$$r_B = \sqrt{\left(\frac{z_K}{a}\right)^2 - x_K^2} - r_K \quad (3-109)$$

или внешнее реактивное сопротивление в случае применения реакторов

$$x_B = \sqrt{\left(\frac{z_K}{a}\right)^2 - r_K^2} - x_K. \quad (3-110)$$

Учитывая равенство (3-108), легко показать, что для получения

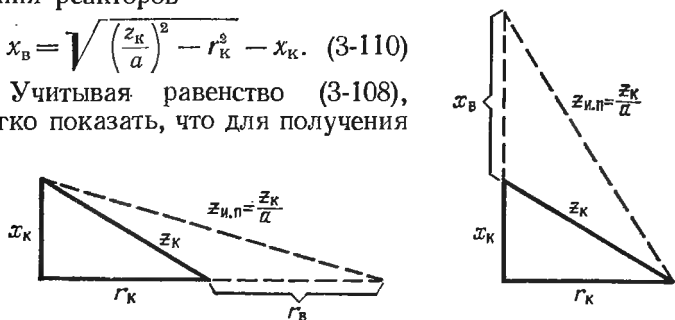


Рис. 3-44. Графический способ расчета сопротивлений пусковых резисторов и реакторов.

r_B — резистора и x_B — реактора.

искусственного пускового момента, составляющего часть μ естественного, требуемое внешнее активное сопротивление будет:

$$r_B = \sqrt{\frac{z_K^2}{\mu} - x_K^2} - r_K \quad (3-111)$$

или внешнее реактивное сопротивление в случае применения реакторов

$$x_B = \sqrt{\frac{z_K^2}{\mu} - r_K^2} - x_K. \quad (3-112)$$

Данные по внутренним активному r_K , реактивному x_K и полному z_K сопротивлениям двигателя приведены в § 3-2 и в приложениях 13—17.

Сопrotивления резистора или реактора можно также легко найти непосредственно графически, как показано на рис. 3-44.

Способ расчета коэффициента трансформации при автотрансформаторном пуске одинаков для асинхронных и синхронных двигателей и приведен в § 4-3.

3-13. ПУСК С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ СЕКЦИЙ РЕЗИСТОРА В СТАТОРЕ

Рассмотрим наиболее экономичный случай — применение резистора в одной цепи статора.

Включение добавочного резистора в одну из цепей статора приводит к несимметрии напряжений на зажимах статора, что вызывает уменьшение пускового момента двигателя и моментов при вращении. В пределе при бесконечно большом сопротивлении добавочного резистора, что равноценно обрыву одной питающей линии статора, пусковой момент двигателя станет равным нулю, но двигатель разовьет момент и сможет вращаться в том направлении, в каком его принудительно толкнут.

1. РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Вывод формул для момента двигателя при включении резистора в одну цепь статора основан на замене полученной несимметричной системы фазных напряжений двумя симметричными с разными амплитудами. При этом система с большей амплитудой имеет тот же порядок следования фаз во времени, что и исходная, а система с меньшей амплитудой имеет обратный порядок следования фаз.

Эти составляющие напряжения вызовут соответственно прямой и обратный моменты, разность которых даст результирующий искусственный момент двигателя (рис. 3-45). Искусственный момент двигателя $M_{и}$ при несимметричной схеме, отнесенный к естественному моменту $M_{е}$ при нормальном включении двигателя без резисторов, определится как разность квадратов фазных напряжений прямого $U_{пр}$ и обратного $U_{об}$, отнесенная к квадрату номинального фазного напряжения двигателя $U_{ф}$, т. е.

$$\frac{M_{и}}{M_{е}} = \frac{M_{пр} - M_{об}}{M_{е}} = \frac{U_{пр}^2 - U_{об}^2}{U_{ф}^2}. \quad (3-113)$$

Нас будут интересовать также и токи цепей статора, чтобы рассчитать добавочный резистор по нагреву. Эти токи определяются делением фазных напряжений на сопротивления фаз.

Перейдем к определению напряжений в (3-113), от которых зависит момент двигателя.

Поскольку требуется решать задачу с векторами, применим для вывода формул комплексный метод, отражающий не только значения, но и направления. Кроме того, для упрощения расчетов будем пользоваться не сопротивлениями, а проводимостями; это позволит нам в дальнейшем использовать круговые диаграммы токов как диаграммы проводимостей. Напишем равенства, из которых можно было бы определить напряжения прямой $U_{пр}$ и обратной $U_{об}$ последовательностей. При обозначении век-

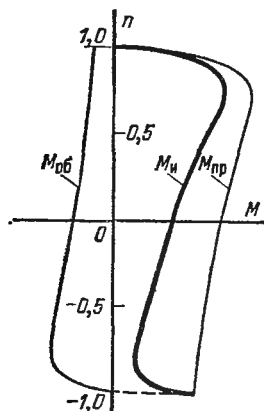


Рис. 3-45. Моменты: прямой $M_{пр}$, обратный $M_{об}$ и результирующий искусственный M_n .

тора через $e^{-j\frac{2\pi}{3}} = a$ (следовательно, $e^{-j2\frac{2\pi}{3}} = e^{+j\frac{2\pi}{3}} = a^2$) фазные напряжения, как известно, примут вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{пр1} + \dot{U}_{об1} = \dot{U}_{пр} + \dot{U}_{об}; \quad (3-114)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{пр2} + \dot{U}_{об2} = \dot{U}_{пр}a + \dot{U}_{об}a^2; \quad (3-115)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{пр3} + \dot{U}_{об3} = \dot{U}_{пр}a^2 + \dot{U}_{об}a. \quad (3-116)$$

Чтобы исключить неизвестные фазные напряжения $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_3$, напомним, пользуясь диаграммой рис. 3-46, геометрические суммы, в которых заменим линейные напряжения на симметричное фазное $\dot{U}_\phi$:

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_\phi (1 - a) = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 - \dot{I}_2 / g; \quad (3-117)$$

$$\dot{U}_{31} = \dot{U}_\phi (1 - a) a^2 = \dot{U}_3 - \dot{U}_1. \quad (3-118)$$

Входящий в (3-117) ток $\dot{I}_2$ линии статора, в которой находится сопротивление r_b добавочного резистора (т. е. проводимость $g = 1/r_b$), определим, обозначая проводимости прямой и обратной последовательностей через $Y_{пр}$ и $Y_{об}$:

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 Y_2 = \dot{U}_{пр} a Y_{пр} + \dot{U}_{об} a^2 Y_{об}. \quad (3-119)$$

Из шести последних равенств составим два, куда бы входили только неизвестные $\dot{U}_{\text{пр}}$ и $\dot{U}_{\text{об}}$. Для этого в равенство (3-117) подставим значения $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$ соответственно из равенств (3-114), (3-115) и (3-119):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\phi}(1-a) = \dot{U}_{\text{пр}} + \dot{U}_{\text{об}} - \dot{U}_{\text{пр}}a - \dot{U}_{\text{об}}a^2 - \\ - \frac{1}{g}(\dot{U}_{\text{пр}}aY_{\text{пр}} + \dot{U}_{\text{об}}a^2Y_{\text{об}}). \end{aligned} \quad (3-120)$$

Также в равенство (3-118) подставим значения $\dot{U}_3$ и $\dot{U}_1$ из (3-116) и (3-114):

$$\dot{U}_{\phi}(1-a)a^2 = \dot{U}_{\text{пр}}a^2 + \dot{U}_{\text{об}}a - \dot{U}_{\text{пр}} - \dot{U}_{\text{об}}. \quad (3-121)$$

Из этих двух равенств (3-120) и (3-121) найдем искомые напряжения прямой и обратной последовательностей, вы-

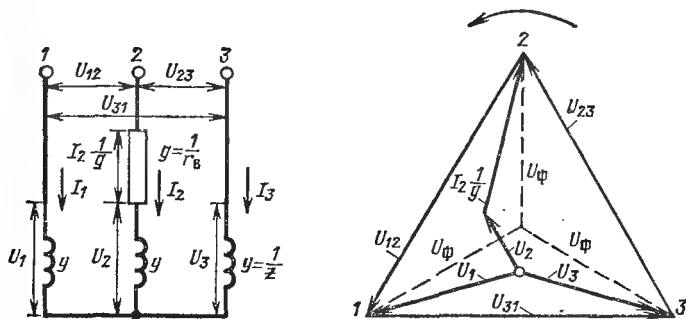


Рис. 3-46. Схема включения обмоток и диаграмма напряжений для асинхронного двигателя с добавочным резистором в одной цепи статора.

раженные через симметричное фазное напряжение сети и проводимости:

$$U_{\text{пр}} = \dot{U}_{\phi} \frac{Y_{\text{об}} + 3g}{Y_{\text{пр}} + Y_{\text{об}} + 3g}; \quad (3-122)$$

$$\dot{U}_{\text{об}} = -\dot{U}_{\phi} a^2 \frac{Y_{\text{пр}}}{Y_{\text{пр}} + Y_{\text{об}} + 3g}. \quad (3-123)$$

Проверим (3-122) и (3-123) на частных случаях. Когда $r_{\text{в}} = 0$, т. е. $g = 1/r_{\text{в}} = \infty$, будем иметь:

$$\dot{U}_{\text{об}} = 0; \quad \dot{U}_{\text{пр}} = \dot{U}_{\phi}.$$

Получилось, как должно было быть при симметричной системе: напряжение обратной последовательности исчезло,

а напряжение прямой последовательности стало равным симметричному фазному напряжению сети.

В случае $r_b = \infty$ (обрыв цепи), т. е. $g = 1/r_b = 0$, из тех же равенств при неподвижном двигателе получим:

$$\dot{U}_{об} = -\dot{U}_{пр} a^2 = -\dot{U}_{пр} e^{j \frac{2\pi}{3}},$$

т. е. при обрыве одной цепи статора двигатель превратился в однофазный и напряжение обратной последовательности стало равным напряжению прямой последовательности и сдвинулось на угол $2\pi/3$.

Теперь, зная напряжения прямой и обратной последовательностей (3-122) и (3-123), определяем относительный искусственный момент μ из равенства (3-113):

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{M_{и}}{M_e} = \frac{M_{пр} - M_{об}}{M_e} = \frac{U_{пр}^2}{U_{\phi}^2} - \frac{U_{об}^2}{U_{\phi}^2} = \\ &= \left| \frac{Y_{об} + 3g}{Y_{пр} + Y_{об} + 3g} \right|^2 - \left| \frac{-\dot{U}_{\phi} a^2}{U_{\phi}} \right|^2 \left| \frac{Y_{пр}}{Y_{пр} + Y_{об} + 3g} \right|^2. \end{aligned}$$

Окончательно

$$\mu = \left| \frac{Y_{об} + 3g}{Y_{пр} + Y_{об} + 3g} \right|^2 - \frac{M_{е.об}}{M_e} \left| \frac{Y_{пр}}{Y_{пр} + Y_{об} + 3g} \right|^2, \quad (3-124)$$

где $M_{е.об}/M_e$ — отношение тормозного момента $M_{е.об}$ в режиме противовключения от нормального фазного напряжения обратной последовательности ($-\dot{U}_{\phi} a^2$) к движущему моменту M_e от нормального фазного напряжения прямой последовательности (U_{ϕ}).

Формула (3-124) окончательная для определения относительного момента, в которой геометрические сложения проводимостей легко можно выполнить графически посредством построения круговой диаграммы для двигателя, поскольку векторы токов являются одновременно и векторами проводимостей в соответствующем масштабе.

Необходимые данные для определения относительного момента по (3-124) определяются следующим образом. На построенной круговой диаграмме рис. 3-47 (показана пунктиром) на линии частоты вращения откладывается влево от $n = 0$ частота вращения двигателя $+n$, для которой требуется определить относительный момент, и по ней строится вектор тока, он же является и вектором проводимости $Y_{пр}$. Откладывая ту же частоту вращения, но в обратном направлении $-n_*$, строим вектор проводимо-

сти $Y_{об}$. Находим моменты M_e и $M_{e,об}$. Затем строим векторы проводимостей, входящие в (3-124), а именно:

$$Y_{об} + 3g = \overline{OA}; \quad Y_{пр} + Y_{об} + 3g = \overline{OB}.$$

По данному способу рассчитаны характеристики IC , приведенные на рис. 3-40 и 3-41.

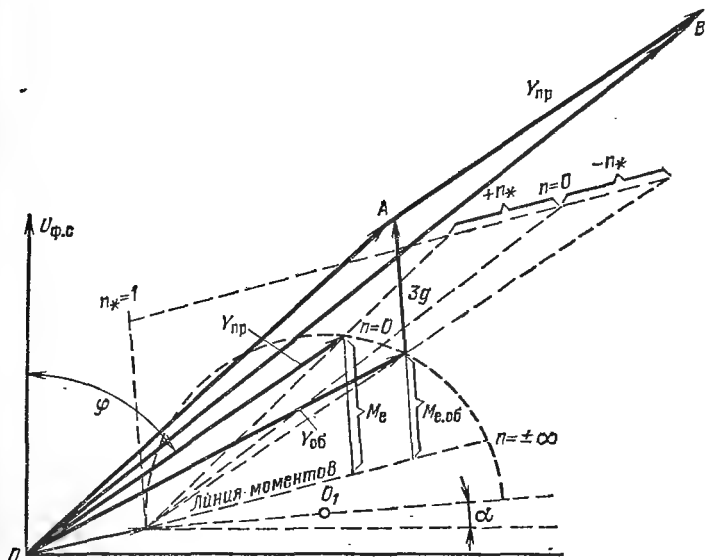


Рис. 3-47. Графическое сложение проводимостей при помощи круговой диаграммы при наличии сопротивления добавочного резистора (проводимости g) в одной цепи статора.

Если принять, что приближенно

$$Y_{об} \approx Y_{пр},$$

то мы получим известную формулу [Л. 14] для относительного искусственного момента, позволяющую обойтись без специальных графических построений:

$$\mu = \frac{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{r_B}{z} \right) \cos \varphi}{1 + \frac{4}{9} \left(\frac{r_B}{z} \right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{r_B}{z} \right) \cos \varphi}, \quad (3-125)$$

где r_B/z — отношение сопротивления добавочного резистора к полному внутреннему сопротивлению цепи статора при заданной частоте вращения n ; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности для заданной частоты вращения.

Подстановкой в (3-126) получим:

$$\mu_{\pi} = \frac{(y \sin \varphi_k)^2 + (y \cos \varphi_k + 3g)^2 - y^2}{(2y \sin \varphi_k)^2 + (2y \cos \varphi_k + 3g)^2} = \frac{6 \frac{y}{g} \cos \varphi_k + 9}{4 \left(\frac{y}{g} \right)^2 + 12 \frac{y}{g} \cos \varphi_k + 9}.$$

Заменяя y/g через $r_{\text{в}}/z_{\text{к}}$, после преобразования окончательно получаем формулу для определения относительного сопротивления добавочного резистора для принятого относительного пускового момента:

$$\frac{r_{\text{в}}}{z_{\text{к}}} = \frac{3}{2} \left[\frac{1 - 2\mu_{\pi}}{2\mu_{\pi}} \cos \varphi_k + \sqrt{\left(\frac{1 - 2\mu_{\pi}}{2\mu_{\pi}} \right)^2 \cos^2 \varphi_k + \frac{1 - \mu_{\pi}}{\mu_{\pi}}} \right]. \quad (3-127)$$

Теперь найдем пусковой ток $I_{\text{и.п}}$, протекающий через пусковой резистор. Из (3-119) и (3-122), считая $Y_{\text{пр}} = Y_{\text{об}} = Y$ и учитывая, что $a^4 = a$, следует:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{и.п}} &= \dot{U}_{\text{пр}} a Y_{\text{пр}} + \dot{U}_{\text{об}} a^2 Y_{\text{об}} = \\ &= \dot{U}_{\text{ф}} Y \left(a \frac{Y + 3g}{2Y + 3g} - a^4 \frac{y}{2Y + 3g} \right) = \dot{I}_{\text{е.п}} a \frac{3g}{2Y + 3g}, \end{aligned}$$

откуда получим относительный ток, пользуясь добавочно диаграммой рис. 3-48:

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{и.п}}}{I_{\text{е.п}}} &= \frac{3g}{\sqrt{(2y \sin \varphi_k)^2 + (2y \cos \varphi_k + 3g)^2}} = \\ &= \frac{3}{\sqrt{4 \left(\frac{y}{g} \right)^2 + 12 \left(\frac{y}{g} \right) \cos \varphi_k + 9}}. \end{aligned}$$

Заменив y/g на $r_{\text{в}}/z_{\text{к}}$, окончательно получим отношение искусственного пускового тока в цепи статора, в которую включен пусковой резистор, к естественному пусковому току:

$$\frac{I_{\text{и.п}}}{I_{\text{е.п}}} = \sqrt{\frac{9}{\left(\frac{r_{\text{в}}}{z_{\text{к}}} \right)^2 + 12 \left(\frac{r_{\text{в}}}{z_{\text{к}}} \right) \cos \varphi_k + 9}}. \quad (3-128)$$

По (3-127) и (3-128) на рис. 3-49 построены кривые, позволяющие без расчета определить сопротивление пускового резистора и пусковой ток в той цепи статора, в которую включен резистор. Кривые построены для трех $\cos \varphi_k$: для двух граничных 0,4 и 0,8 и среднего 0,6.

Как видно из этих кривых, относительный пусковой ток очень мало зависит от $\cos \varphi_k$. Относительное сопротивление пускового резистора также мало зависит от $\cos \varphi_k$, и лишь

при очень малых относительных моментах — около 0,1 уже нельзя не считаться с $\cos \varphi_K$.

Следует также обратить внимание, что для того, чтобы получить искусственный пусковой момент, равный половине естественного, нужно на основании кривых рис. 3-49 принять сопротивление пускового резистора 1,5-кратное

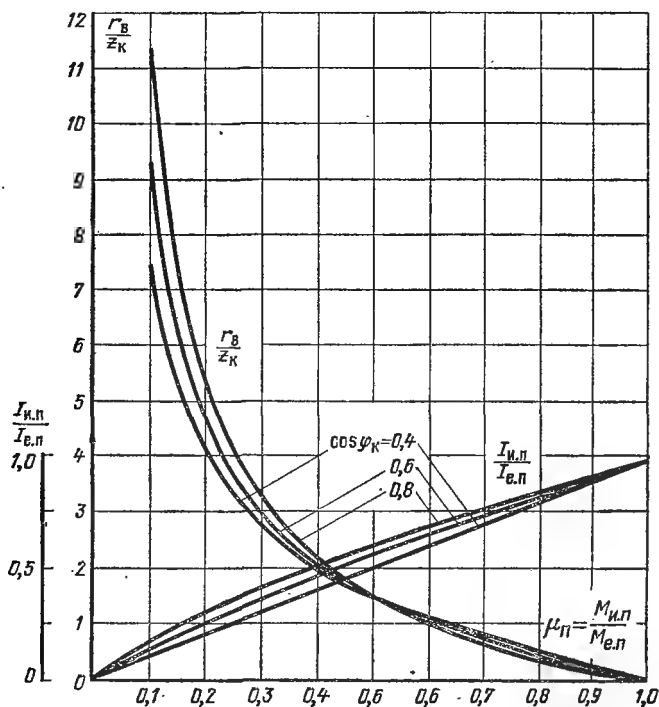


Рис. 3-49. Кривые зависимостей относительного сопротивления r_B/z_K и относительного пускового тока $I_{и.п}/I_{е.п}$ резистора от относительного пускового момента μ при различных $\cos \varphi_K$.

полному внутреннему независимо от $\cos \varphi_K$. В тех случаях, когда неизвестен для двигателя $\cos \varphi_K$ и, как это обычно бывает, особо точно искусственный пусковой момент не требуется, можно принять средний для большинства серий двигателей $\cos \varphi_K = 0,5$.

Пример 3-10. Для быстроходного дистанционно управляемого тельфера с целью уменьшения раскачивания груза при ускорениях принят пуск двигателя передвижения через один резистор в статоре,

как показано на рис. 3-50. Рассчитать сопротивление пускового резистора для привода передвижения, для которого применен двигатель типа МТК-22-6, 380 В, 7,5 кВт, 905 об/мин, $I_{с.н} = 19,3$ А, $I_{е.п} = 4,4I_{с.н}$; $M_{е.п} = 3M_{н}$, $\cos \varphi_k = 0,74$.

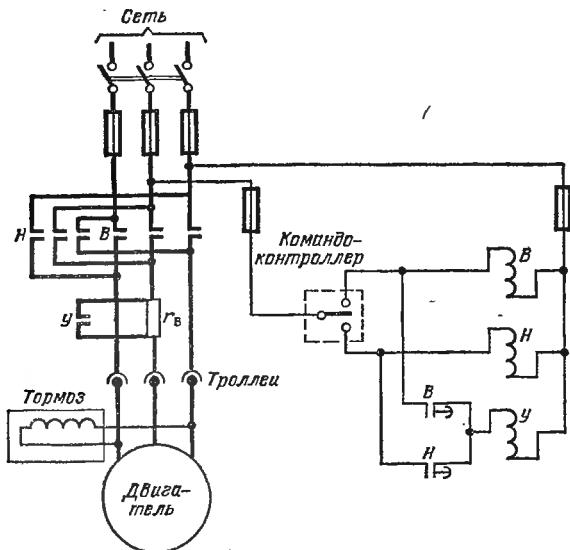


Рис. 3-50. Схема дистанционного управления приводом передвижения тельфера.

Решение. Примем пусковой момент $M_{и.п} = 1,2$ номинального. Относительный пусковой момент получится:

$$\mu_{п} = \frac{M_{и.п}}{M_{е.п}} = \frac{1,2}{3} = 0,4.$$

По кривым рис. 3-49 для $\mu_{п} = 0,4$ и $\cos \varphi_k = 0,74$ находим:

$$\frac{r_{в}}{z_{к}} = 2,1; \quad \frac{I_{и.п}}{I_{е.п}} = 0,5.$$

Искомое сопротивление пускового резистора

$$r_{в} = 2,1 z_{к} = 2,1 \frac{U_{п}}{\sqrt{3} I_{е.п}} = 2,1 \frac{380}{1,73 \cdot 19,3 \cdot 4,4} = 5,44 \text{ Ом.}$$

Через резистор будет протекать пусковой ток

$$I_{и.п} = 0,5 I_{е.п} = 0,5 \cdot 4,4 \cdot 19,3 = 42,5 \text{ А.}$$

Заметим, что для данного случая не может быть применена схема ограничения пускового момента при помощи трех секций резистора в статоре, как на рис. 3-39, 3С, так как катушки тормоза получают пониженное напряжение.

Все сказанное в § 3-8 о динамическом торможении асинхронных двигателей с фазным ротором, а именно: схемы включения обмоток статора, режимы двигателя, расчет данных цепей возбуждения и механических характеристик, справедливо и для частного случая при сопротивлении добавочного резистора ротора, равном нулю.

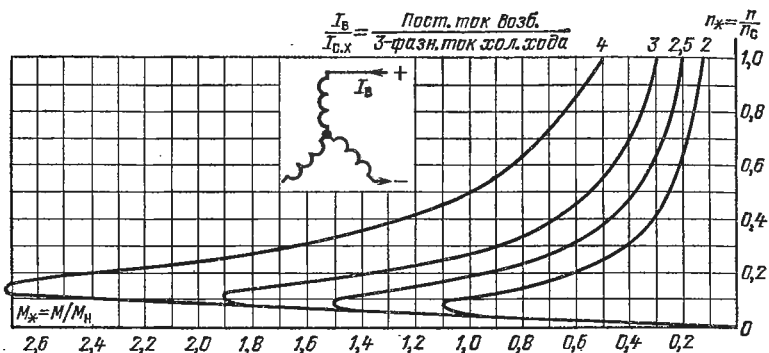


Рис. 3-51. Универсальные механические характеристики динамического торможения для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором типа МТК.

Номинальное скольжение двигателя $s_n = 0,08$.

На рис. 3-51 дано семейство механических характеристик, рассчитанных для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором краново-металлургической серии типа МТК-31-6, 380 В, 11кВт, 920 об/мин, ПВ = 25%; $I_{c.n} = 26,4$ А; $I_{c.x} = 16,2$ А; $I'_{p.n} = 19,2$ А; $r_c = 0,415$ Ом, $x_c = 0,467$ Ом, $r'_p = 0,824$ Ом, $x'_p = 0,708$ Ом, коэффициент трансформации сопротивлений $k_r = 0,595$. Кратность максимального момента равна 3,4.

В основу расчета была положена универсальная кривая намагничивания рис. 3-24, за единицу э. д. с. фазы статора была принята номинальная э. д. с.:

$$E_{ф.с.н} \approx \frac{U_n}{\sqrt{3}} - I_{c.x} x_c = \frac{380}{3} - 16,2 \cdot 0,467 = 212 \text{ В.}$$

Расчет произведен для токов возбуждения 2, 2,5, 3 и 4-кратного трехфазного холостого хода.

Механические характеристики, приведенные на рис. 3-51, показывают, что для асинхронных двигателей с коротко-

замкнутым ротором начальные моменты (при $n_* = 1$) динамического торможения получаются малыми даже при больших токах возбуждения, но затем момент сильно растет и становится максимальным при относительной частоте вращения 0,1—0,2 синхронной. Вследствие малого начального тормозного момента двигатель значительную часть времени замедления вращается с высокой частотой вращения, что приводит к большому выбегу по пути. Это хорошо иллюстрируется табл. 3-5 в § 3-8, где для одних и тех же условий в случае асинхронного двигателя с фазным ротором путь торможения получился 4 оборота ротора при $R_p = 0,4R_{p.н.}$, а в случае двигателя с короткозамкнутым ротором 12 оборотов при небольшом отличии во времени торможения: 1,2 с в первом случае и 1,7 с во втором.

Для получения удовлетворительного торможения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором нужно подавать относительно большие токи возбуждения — до 3—5-кратных трехфазному току холостого хода.

Некоторые типы двигателей, такие как АС, имеют повышенное сопротивление обмотки ротора и поэтому дают более благоприятные механические характеристики.

Для того чтобы представить, какой вид будет иметь механическая характеристика для различных двигателей, нужно помнить выведенный в § 3-8 закон, что при данном токе возбуждения и любых данных моментах частоты вращения двигателя пропорциональны относительным сопротивлениям ротора. Относительное же сопротивление ротора, как было показано, пропорционально номинальному скольжению. Поэтому, чем большее номинальное скольжение имеет двигатель, тем лучшими механическими характеристиками динамического торможения он обладает.

Следует особо обратить внимание, что если характеристики динамического торможения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором являются мало удовлетворительными при торможении с полной частоты вращения ($n_* = 1$), то они являются вполне удовлетворительными при торможении с пониженных частот вращения — 0,2—0,5 синхронной. Это свойство позволяет даже при обычных токах возбуждения иметь хорошее динамическое торможение рольганговых двигателей с короткозамкнутым ротором, работающих с пониженной частотой — 10—25 Гц, т. е. работающих при частотах вращения 0,2—0,5 синхронной. Например, при торможении с частоты вращения 0,2

и 3-кратном токе возбуждения согласно рис. 3-51 двигатель дает начальный момент $1,4 M_n$ и максимальный $1,9 M_n$.

Пример 3-11. Рассчитать сопротивление резистора в цепи постоянного тока динамического торможения для асинхронного двигателя типа МТК-41-8, 380 В, 11 кВт, 685 об/мин, $I_{с.н} = 28,8$ А, $I_{с.х} = 19,4$ А, $r_c = 0,43$ Ом. Двигатель питается от преобразователя частоты 25 Гц. Постоянный ток для динамического торможения подается от сети 220 В. Требуется быстрое замедление.

Решение. Если при частоте 50 Гц двигатель имеет синхронную частоту вращения $n_{с*} = 1$, то при 25 Гц он будет иметь синхронную частоту вращения $n_* = 0,5$.

Для данного двигателя с номинальным скольжением $\frac{750 - 685}{750} = 0,087$ частоты вращения на рис. 3-51 должны быть больше номинальных скольжений в $0,087 : 0,08 = 1,09$ раза.

Принимая ток возбуждения $I_B = 4 I_{с.х}$, мы получим при торможении с частоты вращения $n_* = 0,5$ начальный момент $M_{нач} = 1,0$ и максимальный $M_{макс} = 2,73$, т. е. достаточно большие. По известным статическому моменту и моменту инерции можно при помощи формул § 1-1 рассчитать, разбив кривую момента на участки, время торможения и путь.

Для ограничения тока возбуждения до

$$I_B = 4 I_{с.х} = 4 \cdot 19,4 = 77,6 \text{ А}$$

сопротивление добавочного резистора в цепи ротора должно быть

$$r_B = \frac{U_n}{I_B} - 2r_c = \frac{220}{77,6} - 2 \cdot 0,43 \approx 2 \text{ Ом},$$

3-15. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Рассмотрим способ ступенчатого регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, осуществляемый переключением числа полюсов. Этот способ регулирования дает хорошие механические характеристики двигателя и является наиболее простым и надежным. Он применяется для лифтов, приводов подъема у сборочных, монтажных, строительных кранов и для разнообразных приводов в разных отраслях промышленности.

На рис. 3-52 даны механические характеристики двухскоростного двигателя типа АС-82-6/24, 380 В, 7/1,75 кВт, $n_c = 1000/250$ об/мин, примененного для пассажирского лифта со скоростью движения 1 м/с.

Двигатель имеет две самостоятельные обмотки статора — на 6 полюсов и 24 полюса, обеспечивающие синхронные частоты вращения соответственно 1000 и 250 об/мин. Для обмотки с числом полюсов $2p = 6$ данные указаны при ПВ = 60%, а для обмотки $2p = 24$ при ПВ = 15%.

Для получения точной остановки кабины лифта на этажах двигатель перед остановкой переводится с частоты вращения 1000 об/мин на 250 об/мин и затем быстро останавливается механическим тормозом.

Из рис. 3-52 мы видим, что для данного двигателя максимальный момент в генераторном режиме в 1,5 раза больше, чем в двигательном режиме.

Это объясняется увеличением магнитного потока и соответственно увеличением тока ротора и коэффициента мощности ротора в генераторном режиме.

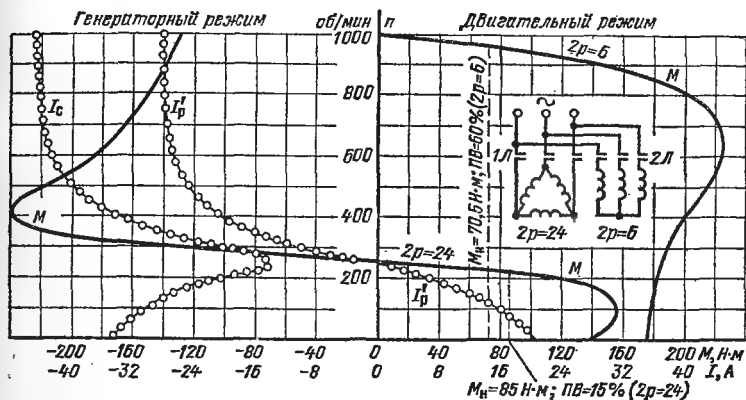


Рис. 3-52. Характеристики двухскоростного асинхронного двигателя типа АС-82-6/24, 220 В, 7/1,75 кВт, $n_c = 1000/250$ об/мин, ПВ=60/15%.

Кривые M , I_c — опытные; кривая I'_p — расчетная. Кривые I_c , I'_p даны только для схемы 2p = 24.

Столь большой критический момент вызвал бы чрезмерно быстрое замедление кабины лифта. Для более плавного замедления кабины вводятся на время снижения частоты вращения ступени резистора в линии статора (не показаны на рис. 3-52).

На рис. 3-53 даны механические характеристики двухскоростного двигателя типа МТК-51-6/16, 380 В, 17/5,3 кВт, 912/291 об/мин, 157/157 Н·м, ПВ = 25/15%, также с двумя самостоятельными обмотками на 6 и 16 полюсов, обеспечивающие синхронные частоты вращения 1000 и 375 об/мин. Этот двигатель предназначен для кранов и для механизмов в металлургии.

Из кривых мы видим, что естественный максимальный момент (сплошная кривая) в генераторном режиме выше

Максимального момента в двигательном режиме в $5,5/2,5 = 2,2$ раза и равен 5,5-кратному номинальному моменту.

Чрезмерно высокий тормозной момент приведет к быстрому замедлению привода и может вызвать большие динамические удары, опасные не только для приводов подъема грузов, но и для механизмов горизонтального перемещения.

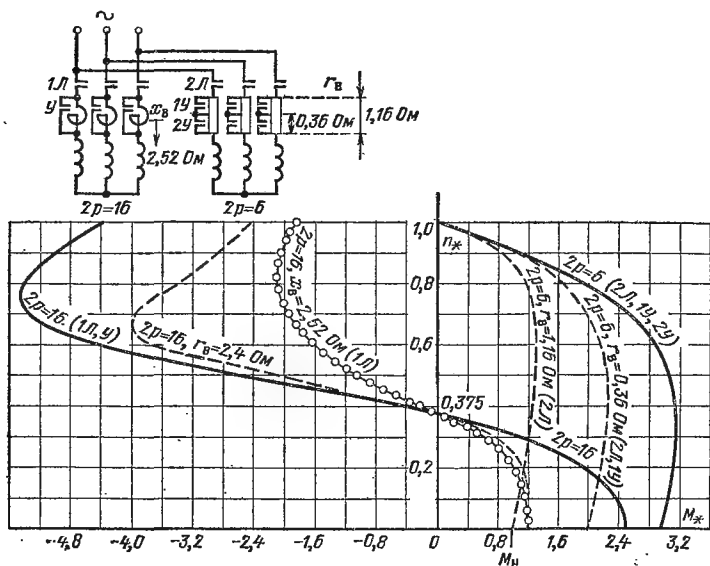


Рис. 3-53. Механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя типа МТК-51-6/16, 380 В, 17/5,3 кВт, 912/291 об/мин, 157/157 Н·м, ПВ=25/15% (данные двигателя предварительные, расчетные).

Сплошные — естественные характеристики; пунктирные — искусственные характеристики при сопротивлениях секций резистора r_B . Сплошная с кружками — искусственная характеристика при сопротивлении реакторов x_B .

Максимальный генераторный момент можно уменьшить введением сопротивлений секций резистора (r_B) в цепи статора.

Механическая характеристика двигателя для этого случая показана на рис. 3-53 пунктиром при $2p = 16$ (схема для добавочного резистора при $2p = 16$ не дана). При уменьшении максимального генераторного момента всего до 4-кратного номинальному пусковой момент уменьшается вдвое и составляет 1,2 номинального.

Дальнейшего увеличения сопротивления добавочного резистора и снижения максимального генераторного момента

и вместе с ним пускового для кранов допускать нельзя, так как при подъеме груза и переводе двигателя с большой частоты вращения на малую груз замедлится, перетянет двигатель в двигательном режиме, переведет его в режим противовключения и будет ускоряться вниз до разноса. В приводах горизонтального перемещения со статическим моментом около номинального двигатель остановится, что также плохо.

Удовлетворительные механические характеристики могут быть получены при включении в цепи статора внешних реакторов с сопротивлением x_b , как показано на рис. 3-53 (см. схему $2p = 16$ и кривую с кружками). В этом случае при уменьшении пускового момента до того же 1,2-кратного номинальному, как и при добавочных резисторах, максимальный генераторный момент уменьшится до 2,5-кратного. Поэтому для двигателей с переключением числа полюсов перевод с большой частоты вращения на малую желателен, а в ряде случаев необходимо, производить при помощи реакторов. При включении асинхронного двигателя на большую частоту вращения ($2p = 6$) вполне удовлетворительные пусковые характеристики получаются при добавочных резисторах (см. пунктирные кривые $2p = 6$).

Характеристики, приведенные на рис. 3-52 и 3-53, рассчитаны по формулам § 3-12.

3-16. ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

В электроприводе перспективным способом регулирования частоты вращения двигателей в широких пределах при частых пусках и торможениях является частотный способ, так как он позволяет получить от простого и надежного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором все необходимые для технологии производства механические характеристики, в том числе высокие частоты вращения, при небольших потерях электроэнергии на преобразование.

В настоящее время еще продолжают применяться преобразователи частоты, состоящие из регулируемого двигателя постоянного тока и синхронного генератора. Такие преобразователи частоты широко используются в прокатных станах металлургических заводов для

питания двигателей рольгангов с одиночным приводом роликов. Нужная скорость рольгангов задается заранее частотой вращения преобразователя. Пуск и реверсирование двигателей роликов осуществляются подключением их группами к сети, питаемой синхронным генератором преобразователя, с помощью контакторов направления; торможение осуществляется противовключением или оно динамическое. Для получения постоянного магнитного потока двигателей на синхронном генераторе поддерживается постоянство отношения напряжения к частоте $U/f = \text{const.}$ Этот закон вытекает из формулы для асинхронных двигателей:

$$E = C_E \Phi f, \quad \text{откуда} \quad \Phi = \frac{1}{C_E} \frac{E}{f} \approx \frac{1}{C_E} \frac{U}{f}.$$

Здесь считается, что э. д. с. двигателя E приблизительно пропорциональна прикладываемому напряжению U при разных частотах.

На рис. 3-54 показано семейство средних механических характеристик для серии асинхронных двигателей АР с короткозамкнутым ротором от 1 до 4,8 кВт при 50 Гц, сконструированных специально для привода рольгангов.

Чтобы получить большие моменты при пуске и торможении противовключением, двигатели типа АР изготавливаются с повышенным сопротивлением проводников ротора.

При этом, как видно из рис. 3-54, полученное улучшение формы кривой момента при частотах выше 30 Гц, дало ухудшение при низких частотах из-за крутизны характеристик.

Большим недостатком контактного управления двигателями с питанием от вращающихся преобразователей являются значительные потери электроэнергии в двигателях и как следствие ограниченная допускаемая частота включения. Как известно, потери в роторе асинхронного двигателя при разбеге вхолостую равны запасу кинетической энергии, которую в процессе разбега приобретают движущиеся массы, а при торможении противовключением — равны 3-кратной величине приобретенного запаса кинетической энергии.

Существенно облагораживается электропривод при плавном пуске и торможении двигателей изменением частоты, что решается рационально только полупроводниковыми преобразователями благодаря их безынерционности и малым потерям электроэнергии на преобразование.

При пуске и торможении регулированием частоты становится ненужным повышенное сопротивление проводников ротора; наоборот, желательно иметь двигатели с минимальным сопротивлением проводников ротора, чтобы получить жесткие механические характеристики при всех частотах и уменьшить потери в роторе. Ускорение двигателя повышением частоты производится в области характеристик

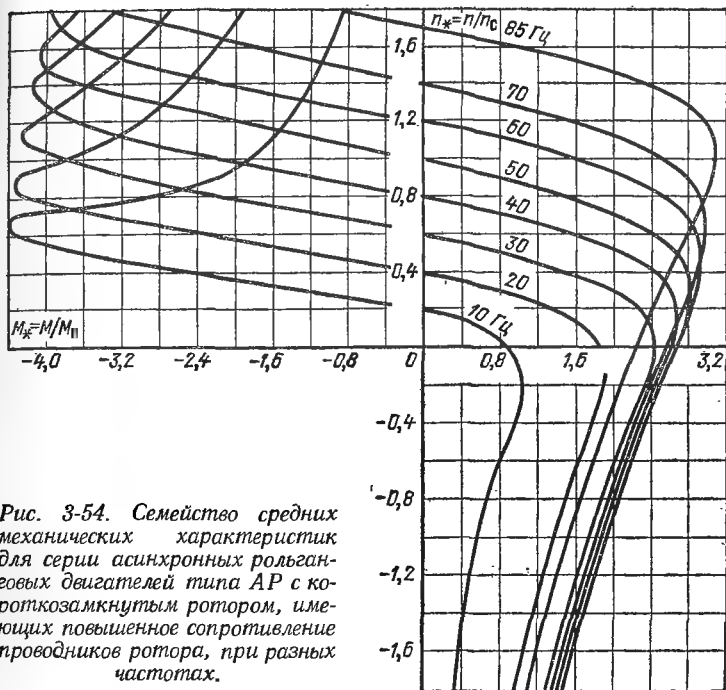


Рис. 3-54. Семейство средних механических характеристик для серии асинхронных рольганговых двигателей типа АР с короткозамкнутым ротором, имеющих повышенное сопротивление проводников ротора, при разных частотах.

двигателя со скольжениями, меньшими критических, следовательно, с максимальным отношением момента к токам статора и ротора. Торможение противовключением и динамическое, расходующее энергию из сети, заменяется на более активное — рекуперативное с отдачей энергии в сеть. При этом уменьшаются потери энергии в роторе и статоре и увеличивается допустимая по условиям нагрева двигателя частота включения, что очень важно для многих приводов повторно-кратковременного режима.

На рис. 3-55 дано семейство механических характеристик асинхронного двигателя обычного исполнения с небольшим сопротивлением проводников короткозамкнутой клетки ротора. Область режима противовключения не приведена как нераациональная по сравнению с рекуперативным способом.

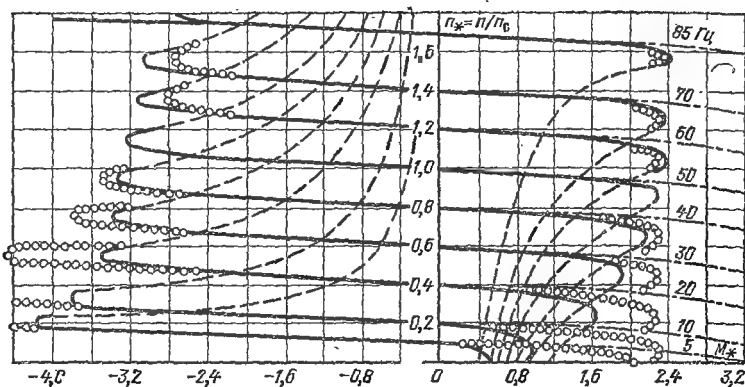


Рис. 3-55. Семейство механических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа А2-81-8, 380 В, 22 кВт, 727 об/мин, с малым сопротивлением проводников ротора, при разных частотах.

Сплошные кривые и пунктир — при $\frac{U_{\phi.s}}{f} = \frac{U_{\phi.s.H}}{f_H} = \text{const}$, при всех f и M ;
пунктир с точкой (почти прямолинейные) при $I_{0H} = \text{const}$ при всех f и M ;
кривые с кружками — при таком $U_{\phi.s}$, постоянном для каждой частоты f при котором дается I_{0H} при номинальном моменте двигателя.

Данные двигателя: тип А2-81-8, 380 В, Δ/Δ , $P_H = 22$ кВт, $n_H = 727$ об/мин, $I_{с.н} = 42,9$ А, $I_0 = 15$ А; $M_{\text{пуск*}} = 1,23$; $M_{м*} = 2,34$, $I_{\text{пуск*}} = 5,0$, $r_c = 0,18$ Ом, $x_c = 0,624$ Ом, $r_0 = 1,1$ Ом, $x_0 = 14,1$ Ом, $r_p' = 0,153$ Ом, $x_p' = 0,485$ Ом.

Механические характеристики двигателя, получаемые при поддержании $\frac{U_{\phi.s}}{f} = \frac{U_{\phi.s.H}}{f_H} = \text{const}$, показаны на рис. 3-55 сплошными линиями, а участки этих характеристик, ненужные при частотном управлении, — пунктиром.

Хотя характеристики получаются жесткие, пусковой момент двигателя с понижением частоты значительно падает. Это происходит из-за уменьшения магнитного потока вследствие большого падения напряжения в активных

сопротивления обмоток статора, которые не уменьшаются с частотой, как реактивные.

Если искусственно поддерживать при всех частотах и нагрузках номинальный ток намагничивания $I_{0н}$, который двигатель имеет при номинальной частоте $f_n = 50$ Гц и

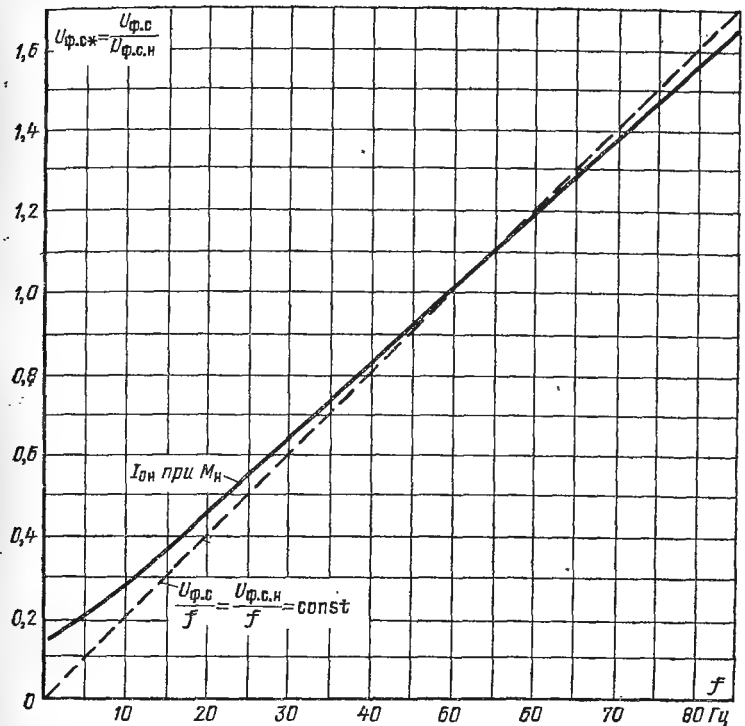


Рис. 3-56. Кривые подводимого напряжения к статору асинхронного двигателя типа А2-81-8, 380 В, 22 кВт, 727 об/мин, при разных частотах.

Пунктирная кривая — при $\frac{U_{\phi.с}}{f} = \frac{U_{\phi.с.н}}{f_n} = const$, при всех f и M ; сплошная кривая — при таком $U_{\phi.с}$, постоянном для каждой частоты $f_{0н}$, при котором имеем $I_{0н}$ при номинальном моменте двигателя.

номинальном моменте M_n , то двигатель будет иметь характеристики, близкие к прямолинейным до 3,5-кратного момента с максимальным моментом, примерно 5-кратным номинальному (пунктир с точкой). Эти характеристики являются наиболее благоприятными, но неизвестен простой и

надежный способ для измерения тока намагничивания, чтобы с помощью обратных связей поддерживать его постоянным. Применение для этих целей элементов Холла и тахогенераторов нежелательно.

Очень хорошие реальные результаты могут быть получены, если для каждой частоты независимо от нагрузки двигателя подавать статору определенное, постоянное для данной частоты напряжение, такое, чтобы при номинальном моменте двигателя иметь номинальный ток намагничивания $I_{0н}$, т. е. номинальный поток. При этом получатся механические характеристики двигателя, показанные кривыми с кружками. Напряжение, которое нужно подавать, чтобы получить эти характеристики, надо программировать в функции только частоты, как показано на рис. 3-56. Из этих кривых видно, что

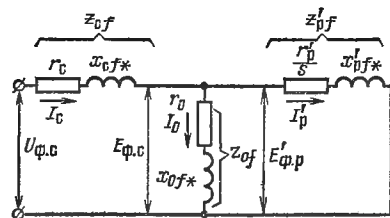


Рис. 3-57. Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя.

при частоте 5 Гц напряжение нужно увеличивать в 1,5 раза по сравнению с кривой $U_{\phi.c}/f = \text{const}$.

Теперь после рассмотрения механических характеристик двигателей при частотном регулировании дадим способы расчета этих характеристик.

Будем исходить из схемы замещения, показанной на рис. 3-57, где обозначены напряжения, токи и сопротивления.

Вначале выведем формулу момента двигателя в функции частоты и скольжения.

Момент асинхронного двигателя равен:

$$M = \frac{m_c I_p'^2 \frac{r'_p}{s}}{\omega_c f_*} = \frac{m_c 60 I_p'^2 \frac{r'_p}{s}}{2\pi n_c f_*} = \frac{28,5 I_p'^2 \frac{r'_p}{s}}{n_c f_*}, \quad (3-129)$$

где m_c — число фаз статора; n_c — синхронная частота вращения двигателя при частоте 50 Гц, об/мин; $f_* = f/f_n$ — относительная частота; s — скольжение ротора.

Ток ротора (приведенный) согласно рис. 3-57

$$I'_p = \frac{E'_{\phi.p}}{z'_{pf}} = \frac{E_{\phi.c}}{\sqrt{\left(\frac{r'_p}{s}\right)^2 + x_p'^2 f_*^2}}. \quad (3-130)$$

Подставив (3-130) в (3-129), получим момент двигателя, выраженный через текущие фазную э. д. с. статора, частоту и скольжение:

$$M = \frac{28,6 E_{\Phi.c}^2 \frac{r'_p}{s}}{n_c f_* \left[\left(\frac{r'_p}{s} \right)^2 + x_p'^2 f_*^2 \right]}. \quad (3-131)$$

Выразим фазную э. д. с. статора $E_{\Phi.c}$ через фазное напряжение $U_{\Phi.c}$, подводимое к статору:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\Phi.c} &= \dot{E}_{\Phi.c} + \dot{I}_c Z_{cf} = \dot{E}_{\Phi.c} + \dot{E}_{\Phi.c} \left[\frac{1}{Z_{0f}} + \frac{1}{Z'_{pf}} \right] Z_{cf} = \\ &= \dot{E}_{\Phi.c} \left[1 + \frac{Z_{cf}}{Z_{0f}} + \frac{Z_{cf}}{Z'_{pf}} \right]. \end{aligned} \quad (3-132)$$

В выражении (3-132) обозначим:

$$C_f = 1 + \frac{Z_{cf}}{Z_{0f}} = \frac{Z_{cf} + Z_{0f}}{Z_{0f}}. \quad (3-133)$$

Комплекс C_f представляет собой отношение подводимого к фазе статора напряжения к напряжению на зажимах намагничивающего контура в схеме замещения (рис. 3-57) при синхронном ходе двигателя.

Определим модуль c_f комплекса C_f , входящий во все дальнейшие формулы:

$$\begin{aligned} C_f &= \frac{Z_{cf} + Z_{0f}}{Z_{0f}} = \frac{(r_c + jx_{cf*}) + (r_0 + jx_{0f*})}{r_0 + jx_{0f*}} = \\ &= \frac{(r_c + r_0) + j(x_c + x_0)f_*}{r_0 + jx_{0f*}} = \frac{(r_c + r_0)r_0 + (x_c + x_0)x_{0f*}^2}{r_0^2 + x_{0f*}^2} - \\ &\quad - j \frac{(r_c + r_0)x_{0f*} - (x_c + x_0)r_{0f*}}{r_0^2 + x_{0f*}^2}, \end{aligned}$$

откуда модуль c_f равен:

$$c_f = \sqrt{\left[\frac{(r_c + r_0)r_0 + (x_c + x_0)x_{0f*}^2}{r_0^2 + x_{0f*}^2} \right]^2 + \left[\frac{(r_c + r_0)x_{0f*} - (x_c + x_0)r_{0f*}}{r_0^2 + x_{0f*}^2} \right]^2}.$$

Окончательно получим:

$$c_f = \frac{1}{r_0^2 + x_{0f*}^2} \sqrt{[(r_c + r_0)r_0 + (x_c + x_0)x_{0f*}^2]^2 + [(r_c + r_0)x_{0f*} - (x_c + x_0)r_{0f*}]^2}. \quad (3-134)$$

Коэффициент (модуль) $c_f = 1,02 \div 1,05$ при частоте 50 Гц; он увеличивается с понижением частоты. Так, для рассмотренного двигателя типа А2-81-8 при ча-

стотах 85—70—60—50—40—30—20—10—5 Гц получились соответственно коэффициенты c_f , равные 1,045—1,045—1,045—1,045—1,066—1,039—1,059—1,092.

Из выражений (3-132) и (3-133):

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\phi.c} &= \dot{U}_{\phi.c} \frac{1}{C_f + \frac{Z_{cf}}{Z'_{pf}}} = \dot{U}_{\phi.c} \frac{Z'_{pf}}{Z_{cf} + C_f Z'_{pf}} = \\ &= \dot{U}_{\phi.c} \frac{\frac{r'_p}{s} + jx'_p f_*}{(r_c + jx_c f_*) + C_f \left(\frac{r'_p}{s} + jx'_p f_* \right)},\end{aligned}$$

откуда

$$\dot{E}_{\phi.c} = \dot{U}_{\phi.c} \frac{\frac{r'_p}{s} + jx'_p f_*}{\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s} \right) + j(x_c + c_f x'_p f_*)}$$

Окончательно фазная э. д. с. статора в зависимости от текущих напряжения $U_{\phi.c}$, приложенного к каждой фазе двигателя, частоты f_* и скольжения s :

$$E_{\phi.c} = U_{\phi.c} \sqrt{\frac{\left(\frac{r'_p}{s} \right)^2 + x'^2_p f_*^2}{\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s} \right)^2 + (x_c + c_f x'_p)^2 f_*^2}}. \quad (3-135)$$

Подставив $E_{\phi.c}$ из (3-135) в (3-131), после преобразований получим общее выражение для момента двигателя в функции текущих фазного напряжения статора, частоты и скольжения:

$$M = \frac{28,6 U_{\phi.c}^2 \frac{r'_p}{s}}{n_c f_* \left[\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s} \right)^2 + (x_c + c_f x'_p)^2 f_*^2 \right]}, \quad (3-136)$$

Условие 1. Поддерживается

$$\frac{U_{\phi.c}}{f} = \frac{U_{\phi.c.n}}{f_n} = \text{const},$$

т. е.

$$U_{\phi.c} = U_{\phi.c.n} \frac{f}{f_n} = U_{\phi.c.n} f_*.$$

Момент двигателя напишем из (3-136), подставив $U_{\text{ф.с.н}} f_*$ вместо $U_{\text{ф.с.}}$:

$$M = \frac{28,6 U_{\text{ф.с.н}}^2 f_* \frac{r'_p}{s}}{n_c \left[\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s} \right)^2 + (x_c + c_f x'_p)^2 f_*^2 \right]}, \quad (3-137)$$

где $U_{\text{ф.с.н}}$ — номинальное фазное напряжение статора при частоте 50 Гц.

Условие 2. Поддерживается номинальный ток намагничивания при всех частотах и моментах двигателя. Задача состоит в определении напряжений $U_{\text{ф.с.}}$, которые нужно подавать статору двигателя при разных частотах и нагрузках (или скольжениях), чтобы иметь $I_{0\text{н}} = \text{const}$.

Определяем из (3-135) номинальную фазную э. д. с. статора $E_{\text{ф.с.н}}$ по номинальному фазному напряжению двигателя $U_{\text{ф.с.н}}$ при номинальной нагрузке, т. е. $s = s_{\text{н}}$ при 50 Гц, т. е. $f_* = 1$:

$$E_{\text{ф.с.н}} = U_{\text{ф.с.н}} \sqrt{\frac{\left(\frac{r'_p}{s_{\text{н}}} \right)^2 + x_p'^2}{\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s_{\text{н}}} \right)^2 + (x_c + c_f x'_p)^2}}. \quad (3-138)$$

Для получения точных расчетов желательно найти $s_{\text{н}}$ из (3-136) или (3-143) при $M_{\text{н}}$, $U_{\text{ф.с.н}}$, $f_* = 1$, а не из приближенных каталожных данных.

Номинальный ток намагничивания

$$I_{0\text{н}} = \frac{E_{\text{ф.с.н}}}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}. \quad (3-139)$$

Текущее значение фазной э. д. с. статора при $I_{0\text{н}} = \text{const}$:

$$E_{\text{ф.с.}} = I_{0\text{н}} \sqrt{r_0^2 + x_0^2 f_*^2} \quad (3-140)$$

и, наконец, искомое текущее значение фазного напряжения статора $U_{\text{ф.с.}}$ найдется из (3-135) подстановкой $E_{\text{ф.с.}}$ из (3-140). После преобразований получим:

$$U_{\text{ф.с.}} = I_{0\text{н}} Z_{\Sigma}, \quad \left. \begin{aligned} &\text{где} \\ &Z_{\Sigma} = \sqrt{\frac{(r_0^2 + x_0^2 f_*^2) \left[\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s} \right)^2 + (x_c + c_f x'_p)^2 f_*^2 \right]}{\left(\frac{r'_p}{s} \right)^2 + x_p'^2 f_*^2}} \end{aligned} \right\} \quad (3-141)$$

Формулу момента двигателя при $I_{0н} = \text{const}$ получим при подстановке в (3-136) значения $U_{ф.с}$ из (3-141) после преобразований:

$$M = \frac{28,6 I_{0н}^2 \frac{r'_p}{s} (r_0^2 + x_0^2 f_*^2)}{n_c f_* \left[\left(\frac{r'_p}{s} \right)^2 + x_p'^2 f_*^2 \right]}. \quad (3-142)$$

Эту же формулу момента легко получить подстановкой в (3-131) выражения для $E_{ф.с}$ из (3-140).

Условие 3. Для каждой частоты задается свое постоянное фазное напряжение статора $U_{ф.с}$ такое, чтобы получить номинальный намагничивающий ток $I_{0н}$ только при номинальном моменте $M_{нн}$.

Найдем для любой текущей частоты f_* скольжение $s_{нf}$ при номинальном моменте.

Подставив в (3-142) $M_{нн}$, найдем в явном виде номинальное скольжение $s_{нf}$ при данной частоте f_* :

$$\left. \begin{aligned} s_{нf} &= \frac{r'_p}{a + \sqrt{a^2 - x_p'^2 f_*^2}}, \\ a &= \frac{14,3 I_{0н}^2}{M_{нн} n_c} \frac{(r_0^2 + x_0^2 f_*^2)}{f_*}. \end{aligned} \right\} \quad (3-143)$$

где

Здесь $I_{0н}$ найдем из (3-139).

Фазное напряжение статора для любой частоты f_* определим из (3-141), подставив вместо s значение $s_{нf}$ из (3-143):

$$U_{ф.с} = I_{0н} \sqrt{\frac{(r_0^2 + x_0^2 f_*^2) \left[\left(r_c + c_f \frac{r'_p}{s_{нf}} \right)^2 + (x_c + c_f x_p')^2 f_*^2 \right]}{\left(\frac{r'_p}{s_{нf}} \right)^2 + x_p'^2 f_*^2}}}. \quad (3-144)$$

Моменты двигателя получим по (3-136), подставив для каждой заданной частоты $U_{ф.с}$ из (3-144).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Благодаря хорошим энергетическим показателям по коэффициенту мощности, к. п. д. и повышенной надежности вследствие значительного воздушного зазора между

статором и ротором синхронные двигатели все больше и больше вытесняют асинхронные двигатели в мощных установках с длительным режимом работы. Синхронный двигатель стал почти монопольным для крупных компрессоров и насосов, двигатель-генераторов, для главных приводов непрерывных нерегулируемых прокатных станков, для средних и крупных приводов в бумажной, цементной промышленности.

Для мощных двигателей часто требуется ограничение пускового тока, в ряде случаев требуется электрическое торможение. Ниже рассматриваются способы и приводятся расчеты для ограничения пускового тока и для электрического торможения.

4-1. НОМИНАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Для расчетов в относительных значениях и обобщения выводов удобно пользоваться понятием «номинальное сопротивление статора». *Номинальным сопротивлением статора синхронного двигателя будем называть такое полное сопротивление, состоящее из внутреннего и внешнего, которое при номинальном напряжении сети определяет номинальный ток статора.*

Обозначая $U_{с.н}$ — номинальное линейное напряжение статора; $I_{с.н}$ — номинальный ток статора, получаем номинальное сопротивление статора

$$z_{с.н} = \frac{U_{с.н}}{\sqrt{3} I_{с.н}}. \quad (4-1)$$

Относительные активное r и реактивное x сопротивления цепи статора определяются

$$r_* = \frac{r}{z_{с.н}} \quad \text{и} \quad x_* = \frac{x}{z_{с.н}}. \quad (4-2)$$

4-2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для обеспечения нормального ускорения нас интересуют пусковые характеристики синхронного двигателя, работающего в режиме асинхронного двигателя с беличьей клеткой на роторе. На рис. 4-1 показаны примерные для одного синхронного двигателя пусковые характеристики: момента, тока статора и тока возбуждения ротора в зависимости от частоты вращения. В механической характеристике особо важными являются два значения момента: M_n — пусковой момент для обеспечения трогания привода с места

и $M_{вх}$ — входной момент, т. е. момент при частоте вращения 0,95 синхронной. Для благоприятного вхождения ротора в синхронизм входной момент должен быть больше статического от нагрузки, чтобы двигатель мог ускориться в асинхронном режиме до частоты вращения 0,95 синхронной, тогда подачей возбуждения можно заставить двигатель войти в синхронизм.

Требуемые пусковой, входной и максимальный моменты для синхронных двигателей, применяемых в разных от-

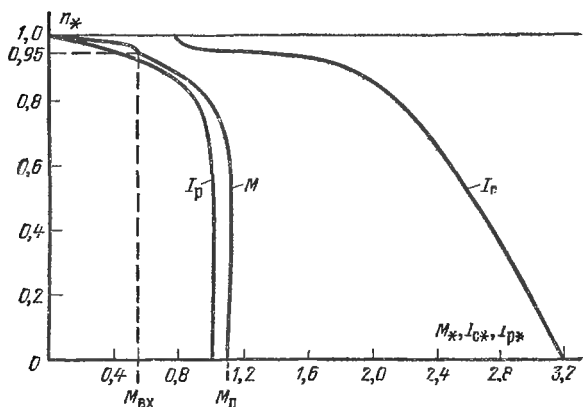


Рис. 4-1. Примерные характеристики относительных момента M , тока статора I_c и тока возбуждения ротора I_p для тихоходного синхронного двигателя.

раслях промышленности, даны в табл. 4-1. В ней учитываются статические моменты, моменты инерции привода и ударные нагрузки.

Привод шаровых мельниц характерен высоким пусковым и входным моментами, а центробежных вентиляторов — малым пусковым и большим входным моментами. Двигатель-генераторы, пускаемые всегда вхолостую, требуют сравнительно высокого пускового момента, так как при длительных остановках выжимается масло между валом и подшипником.

Для привода с большими пусковыми и входными моментами, а также с резко колеблющейся нагрузкой предпочтительнее использовать двигатели с опережающим коэффициентом мощности порядка 0,8.

Высокий пусковой момент синхронного двигателя при малом входном может быть получен применением пусковой

Моменты синхронных двигателей, требуемые промышленными механизмами (ориентировочные данные [Л. 26])

Приводимые механизмы	Сочленение двигателя с механизмом	Относительный момент		
		пусковой	входной	максимальный

Цемент, нерудные и рудные ископаемые¹

Шаровые мельницы Дробилки конические	Зубчатая передача	1,75—2	1,1—1,2	1,75
	Непосредственное или ременная передача	1,5—2	1—1,25	2
Дробилки молотковые	Непосредственное	1,5	1,15	2,5
Дробилки цеховые	Непосредственное или ременная передача	1,5—2,25	1—1,25	2,5
Дробильные валки	То же	2,25	1	2,25
Стержневые мельницы	» »	2	1,2	1,75
Трубные мельницы	Редуктор	1,9	1,2	1,75

Компрессоры и воздуходувки²

Воздуходувки циклоидальные нагнетательные	Непосредственное	0,4—0,6	0,4—0,6	1,5
Турбовоздуходувки	Непосредственное или через мультипликатор	0,4	0,6	1,5
Компрессоры воздушные поршневые	Непосредственное	0,4	0,4	1,5
Компрессоры аммиачные поршневые	Для быстроходных — ременная передача, для тихоходных — непосредственное соединение	0,4	0,4	1,5
Компрессоры фреоновые	То же	0,45	0,6	1,5
Компрессоры газовые поршневые	Непосредственное	0,4	0,4	1,5

Вентиляторы¹

Вентиляторы тяговые и дутьевые	Непосредственное или ременная передача	0,5	0,6—1,25	1,75
--------------------------------	---	-----	----------	------

Мукомольные мельницы¹

Трансмиссии	Непосредственное или ременная передача	1,75—2,25	1—1,25	1,75
-------------	---	-----------	--------	------

Обработка дерева²

Ленточные и продольно-разрезные пилы	Непосредственное или ременная передача	0,8—1,25	0,75—1,15	2,2—2,5
Мельницы ² Жордана	Непосредственное	0,5	0,5	1,5
Машины ¹ для измельчения бумажной массы	Ременная передача	1,25	1	1,75
Дробилки ² для отходов лесопильного производства и рубильные машины	Непосредственное	0,8—1,25	0,8—1,1	2,25

Приводимые механизмы	Сочленение двигателя с механизмом	Относительный момент		
		пусковой	входной	максимальный
Насосы				
Насосы центробежные	Непосредственное	0,35—0,2	Задвижки закрыты, 0,35—0,5, открыты, 1,0—1,2	1,5
Насосы ² поршневые	Зубчатая передача	0,5—0,75	0,25—0,5	1,5
Насосы поршневые вакуумные	Непосредственное или ремённая передача	0,3—0,5	0,6—0,85	1,5
Насосы ¹ вращающиеся вакуумные	То же	0,4	0,55—1	1,5
Резина				
Резиновые ² смесители	Непосредственное	1,25—1,5	1	2,5
Трансмиссии ⁴ для привода смесителей	Для тихоходных — непосредственное, для быстроходных — через редуктор	1,1—1,5	1,1—1,25	1,75—2,5
Сталь				
Обжимные станы	Непосредственное, иногда через редуктор	0,8—1	0,5—0,6	3—3,5
Непрерывные станы ⁶ , прокатка сталей, листа, полосы, сутунки, заготовки для труб, полосовые станы	Обычно непосредственное, иногда через редуктор при применении быстроходных двигателей	0,5—1	0,5—1	2,5—3,5
Проволочные станы ³	Непосредственное	0,6—1	0,5—0,6	2,25—2,75
Калибровочные и редуccionные станы	Непосредственное, иногда через редуктор	0,8—1	0,5—0,6	3—3,5
Двигатель-генераторы	—	0,4	0,3	2

¹ Пуск двигателя под нагрузкой.

² Пуск двигателя без нагрузки.

³ Пуск двигателя обычно без нагрузки. Может потребоваться реверс при авариях.

⁴ Пуск двигателя под нагрузкой. Может потребоваться реверс при авариях.

⁵ Пуск двигателя без нагрузки. Может потребоваться реверс под нагрузкой при авариях.

клетки большого сопротивления, а небольшой пусковой и высокий входной моменты — при малом активном и большом реактивном сопротивлениях пусковой клетки. Максимальный момент двигателя увеличивается с увеличением зазора.

Синхронный двигатель для толчкообразной нагрузки рекомендуется выбирать без запасов — по статическому

максимальному (опрокидывающему) моменту, так как переходный максимальный момент значительно выше статического (рис. 4-2). Повышенный максимальный момент в переходном режиме объясняется запаздыванием размагничивающего действия статора на полюсы при толковых нагрузках. Современные быстродействующие системы автоматического регулирования способны поддерживать поток полюсов ротора практически постоянным.

Максимальный переходный момент возрастает с уменьшением реактивных сопротивлений синхронного двигателя, в особенности переходной реактивности по продольной оси.

Синхронные двигатели изготавливаются с естественным пусковым моментом и входным моментом от 0,5-до 2-кратного номинальному. Пусковой ток статора для разных типов синхронных двигателей равен от 3-до 8-кратного номинальному, причем быстроходные двигатели имеют большие кратности пускового тока, чем тихоходные.

При асинхронном пуске синхронного двигателя в обмотке возбуждения ротора, замкнутой на разрядный резистор, наводится э. д. с., которая вызывает переменный ток, примерно равный номинальному постоянному току возбуждения. Следует обратить внимание на то, что токи неподвижного ротора мало зависят от сопротивления разрядного резистора, так как при частоте тока 50 Гц сопротивление обмотки ротора (преимущественно реактивное) во много раз превосходит сопротивление разрядного резистора. Во время ускорения двигателя падает э. д. с. ротора и вместе с частотой падает также реактивное сопротивление, поэтому ток ротора, как показано на рис. 4-1, остается почти постоянным.

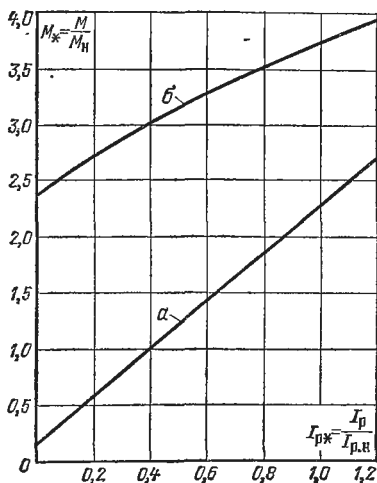


Рис. 4-2. Типичные кривые максимального (опрокидывающего) момента синхронного двигателя при $\cos \varphi$ опережающем.

а — установившийся режим; б — переходный режим при ударной нагрузке.

Пусковой ток крупных синхронных двигателей нередко приходится ограничивать для уменьшения падения напряжения в питающей системе или для уменьшения динамических усилий в лобовых частях обмотки статора и, в очень редких случаях, для ограничения пускового момента.

Поскольку ограничение тока синхронных двигателей значительно удорожает установку, так как требует дополнительно реакторов или резисторов или же автотрансформаторов, а также аппаратуру, можно идти на это только в случаях крайней необходимости.

Для крупных синхронных двигателей иногда предпочитают исполнение статора с двумя обмотками, из которых одна включается на время пуска, а другая подключается параллельно при подсинхронной частоте вращения. Эта система снижения пускового тока является простой и дешевой, так как не требует токоограничивающих устройств.

Падение напряжения на шинах питания при обычно применяемом совмещенном питании силы и света допускается до 90% и при редких кратковременных пусках может быть допущено до 85% номинального напряжения.

Прямой пуск синхронных двигателей по данным завод-изготовителей допускается, если мощность, приходящаяся на один полюс, $\frac{P_{\text{кВт}}}{\text{число полюсов}} \leq 250 \div 300 \text{ кВт}$ при напряжении 3000 В и 200—250 кВт при напряжении 6000 В.

В каталогах на синхронные двигатели указывается, какие двигатели не допускают прямого пуска, и для них задаются допускаемые максимальные напряжения, которые для двигателей общего применения составляют от 60 до 90%, а для турбодвигателей — от 50 до 60% номинального напряжения.

В настоящее время имеется стремление изготавливать синхронные двигатели, допускающие прямой пуск от сети для любых мощностей.

1. РЕАКТОРЫ И РЕЗИСТОРЫ

Способы расчета реактивных и активных внешних сопротивлений для ограничения пускового тока и момента до заданной кратности и сравнительные механические пусковые характеристики приведены в § 3-11 и на рис. 3-40

и 3-41. Согласно § 3-11 для получения искусственного пускового тока $I_{н.п}$, составляющего часть a естественного пускового тока $I_{е.п}$, требуется внешнее реактивное сопротивление реактора

$$x_B = \sqrt{\left(\frac{z_K}{a}\right)^2 - r_K^2} - x_K \quad (4-3)$$

или внешнее активное сопротивление резистора

$$r_B = \sqrt{\left(\frac{z_K}{a}\right)^2 - x_K^2} - r_K. \quad (4-4)$$

Для ограничения пускового момента и получения кратности $\mu_n = M_{н.п}/M_{е.п}$ формулы получают тот же вид, но в них заменяется $a^2 = \mu$, т. е.

$$x_B = \sqrt{\frac{z_K^2}{\mu} - r_K^2} - x_K; \quad (4-5)$$

$$r_B = \sqrt{\frac{z_K^2}{\mu} - x_K^2} - r_K. \quad (4-6)$$

Здесь r_K , x_K и z_K — внутренние пусковые (короткого замыкания) активное, реактивное и полное сопротивление цепей двигателя, которые легко определяются по естественному пусковому току $I_{е.п}$ и пусковому $\cos \varphi_K$, а именно:

$$z_K = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{е.п}}; \quad r_K = z_K \cos \varphi_K;$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = z_K \sin \varphi_K.$$

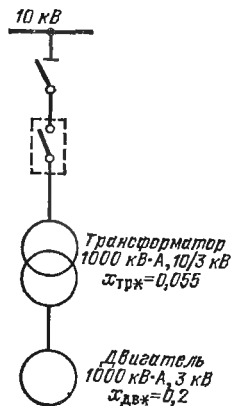


Рис. 4-3. Использование понижающего трансформатора одновременно и как реактора.

Необходимо особо обратить внимание на то, что при питающих системах 10 и 35 кВ применяемые часто для двигателей индивидуальные понижающие трансформаторы одновременно выполняют роль реакторов; например, по схеме рис. 4-3 для синхронного двигателя 1000 кВ·А с реактивностью $x_{дв*} = 0,20$ и для соответствующего ему трансформатора 1000 кВ·А с $x_{тр*} = 0,055$ пусковой ток двигателя будет ограничен примерно до $\frac{0,20}{0,20 + 0,055} = 0,78$ естественного пускового тока.

Двигатели напряжением 3 кВ по сравнению с 10 кВ имеют большую мощность в том же габарите машины и

более высокий к. п. д.; поэтому в тех случаях, когда требуется ограничение пускового тока, применение двигателей 3 кВ вместо 10 кВ с использованием понижающего трансформатора одновременно и как реактора может дать значительную выгоду.

Для мощных синхронных двигателей, питаемых от электростанции или понизительной подстанции с реактивными цепями, нужно учитывать в расчетах реактивность головного реактора.

2. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Схема автотрансформаторного пуска показана на рис. 3-39, А. Эта схема, показанная для асинхронного двигателя, остается такой же в части цепи статора для синхронного двигателя. Ток возбуждения подается в обмотку ротора синхронного двигателя после отключения нулевого масляного выключателя H , т. е. после перехода с автотрансформаторного пуска на реакторный.

Ниже приводятся три возможных условия для определения коэффициента трансформации k автотрансформатора:

а) Если требуется ограничить естественный пусковой ток двигателя $I_{е.п}$ до значения искусственного пускового тока $I_{и.п}$, то

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_{и.п}}{I_{е.п}}. \quad (4-7)$$

б) Если требуется ограничить ток сети I_c , то, учитывая ступень уменьшения тока в автотрансформаторе, получаем:

$$\frac{I_c}{I_{е.п}} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = k^2, \quad (4-8)$$

откуда

$$k = \sqrt{I_c / I_{е.п}}. \quad (4-9)$$

в) Если требуется уменьшить естественный пусковой момент двигателя $M_{е.п}$ до искусственного пускового момента $M_{и.п}$, то, учитывая, что момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, получаем:

$$k = \sqrt{M_{и.п} / M_{е.п}}. \quad (4-10)$$

Из приведенных соотношений выявляется область применения автотрансформаторов. При автотрансформаторном

пуске, если, например, искусственный пусковой ток двигателя равен 0,5 естественного, забираемый ток из сети составляет 0,25 этого тока. При реакторном же пуске ток сети равен току двигателя.

Поскольку автотрансформаторный пуск обходится дорого, его можно применять очень редко и только если снижение пускового тока, обеспечиваемого реакторами, недостаточно для сети. Это бывает в тех случаях, когда требуются большие пусковые моменты, а питающая сеть не допускает больших пусковых токов.

В некоторых случаях пуск через реактор может быть предпочтительным перед автотрансформаторным благодаря большему входному моменту (см. рис. 3-40).

3. ПРОВЕРКА ПУСКОВОГО И ВХОДНОГО МОМЕНТОВ

В зависимости от вида нагрузки может требоваться большой пусковой момент или входной момент двигателя или же от двигателя могут и не требоваться большие моменты. Так, для привода вентилятора, у которого, как известно, статический момент нарастает пропорционально квадрату частоты вращения вполне удовлетворительным является небольшой пусковой момент, но входной момент должен быть большим и не менее номинального, т. е.

$$M_{\text{п}} = 0,5M_{\text{н}}; \quad M_{\text{вх}} \geq M_{\text{н}}.$$

Для двигателей непрерывного нерегулируемого прокатного стана достаточны:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{вх}} \approx (0,5 \div 1) M_{\text{н}}.$$

Для двигателей преобразовательных агрегатов приемлемо:

$$M_{\text{п}} = 0,4M_{\text{н}}; \quad M_{\text{вх}} = 0,3M_{\text{н}}.$$

Выбирая систему ограничения пускового тока двигателя, необходимо проверять пусковой и входной моменты двигателя.

Как уже было показано, отношение искусственного пускового момента к естественному пусковому равно отношению квадратов напряжений: поданного к номинальному. Этот закон справедлив и для входного момента, но для него сложнее определить поданное напряжение, так как, например, при реакторном пуске с ростом частоты вращения растет поданное напряжение к статору вследствие уменьшения падения напряжения в реакторе от спада тока.

Можно рассчитать отношение искусственного входного момента $M_{и.вх}$ к естественному $M_{е.вх}$, если иметь от завода-изготовителя двигателя значения активного $r_{вх}$ и реактивного $x_{вх}$ сопротивлений двигателя при входной частоте вращения. При наличии пусковых реакторов в статоре с реактивным сопротивлением x_B получим:

$$\frac{M_{и.вх}}{M_{е.вх}} \approx \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{r_{вх}^2 + x_{вх}^2}{r_{вх}^2 + (x_{вх} + x_B)^2}. \quad (4-11)$$

Аналогично в случае применения активных внешних сопротивлений r_B получим:

$$\frac{M_{и.вх}}{M_{е.вх}} \approx \frac{r_{вх}^2 + x_{вх}^2}{(r_{вх} + r_B)^2 + x_{вх}^2}. \quad (4-12)$$

4-4. РАЗРЯДНЫЙ РЕЗИСТОР

При асинхронном пуске синхронного двигателя роторная обмотка замыкается на разрядный резистор (рис. 4-4, а). Этот резистор служит трем целям: ограничивает напряжение на обмотке ротора при пуске, улучшает пусковую характеристику двигателя и гасит энергию поля при коротком замыкании в цепи статора.

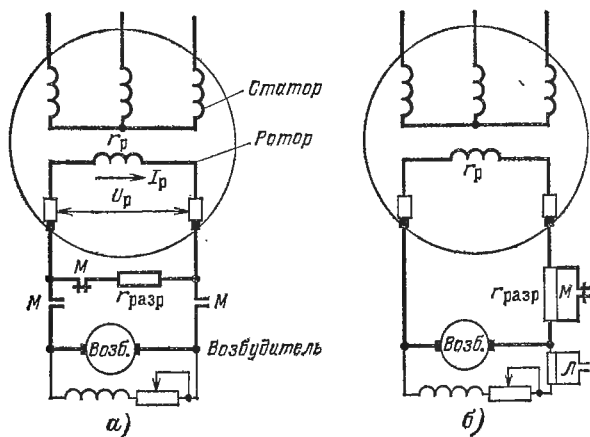


Рис. 4-4. Схемы цепей возбуждения синхронных двигателей.

а — отключаемый возбудитель; б — глухоподключенный возбудитель.

Если оставить при пуске двигателя обмотку ротора разомкнутой, то в начальный момент на ней появится высокое напряжение (десятки тысяч вольт), недопустимое для изоляции. Кроме того, двигатель будет иметь низкий входной момент.

Если обмотку ротора замкнуть накоротко, то, хотя напряжение на кольцах ротора будет равно нулю и входной момент может иметь достаточно высокое (не максимальное) значение, двигатель будет развивать пониженный пусковой момент и получит некоторый провал мо-

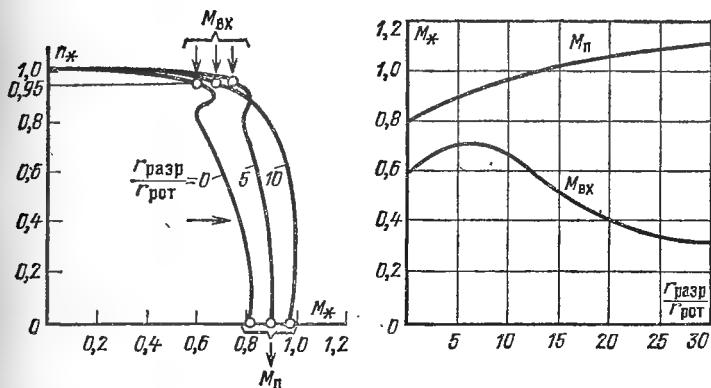


Рис. 4-5. Примерные характеристики двигателей, показывающие влияние сопротивления разрядного резистора $r_{\text{разр}}$, кратного сопротивлению ротора $r_{\text{рот}}$, на пусковой ($M_{\text{п}}$) и входной ($M_{\text{вх}}$) моменты.

мента при частоте вращения выше половинной от явления «одноосного включения»; момент в месте провала может быть меньше входного.

Недостатком замыкания колец накоротко является еще замедленное спадание потока ротора, приводящее к более сильному выгоранию секций и сердечника статора при коротком замыкании фаз.

Рисунок 4-5 показывает, как изменяются пусковой и входной моменты синхронного двигателя при разных сопротивлениях разрядного резистора.

Сопротивление разрядного резистора, 10-кратное сопротивлению обмотки ротора, является средним компромиссным по условиям ограничения напряжения ротора до допустимого, получения удовлетворительных пускового и

входного моментов и получения достаточно быстрого гашения поля при коротких замыканиях фаз статора.

Широко применяется пуск синхронных двигателей с глухоподключенным возбудителем, насаженным на вал синхронного двигателя (рис. 4-4, б). Это позволяет упростить цепи возбуждения, удешевить установку и несколько увеличить надежность схемы за счет непрерывающейся цепи возбуждения. Такая система успешно

применяется для двигателей крупных преобразовательных агрегатов и разных приводов, пускаемых вхолостую и при небольших нагрузках.

При пуске двигателя контакт M открыт. Он замыкается в конце пуска при подсинхронной частоте вращения и остается замкнутым во время работы двигателя.

Для двигателей небольшой и средней мощности — до 2000 кВт, пускаемых вхолостую, схема рис. 4-4, б может быть еще упрощена путем исключения разрядного резистора. Такая схема широко применяется.

Все шире начинают применять полупроводниковые возбудители. В ряде случаев очень важным является качество полупроводниковых возбуди-

телей — быстродействие, необходимое для кратковременных форсировок возбуждения синхронных двигателей при ударных нагрузках и падениях напряжения в питающей сети.

На рис. 4-6 приведена одна из схем. Регулирование возбуждения осуществляется изменением угла управления тиристорами T_1 и T_2 . Трансформатор выбирается на вторичное напряжение в зависимости от требуемого коэффициента форсировки. Обычно форсировку принимают такой, чтобы при полностью открытых тиристорах моста напряжение на обмотке возбуждения было равно 1,5—3-кратному номинальному. Форсировка по току принимается до 1,5-кратной номинальному току возбуждения.

В ряде применений достаточно иметь тиристоры только в одной половине моста (T_1), в другой — могут быть диоды (D). Симметричная мостовая схема, т. е. с тиристорами в обеих половинах (T_1, T_2), применяется лишь в тех случаях, когда

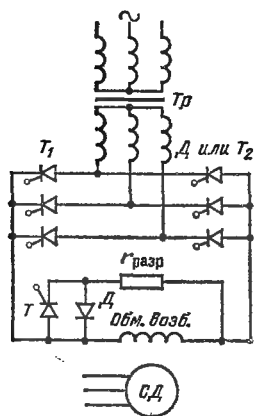


Рис. 4-6. Принципиальная схема управления возбуждением синхронного двигателя.

требуется не только быстрая форсировка, но и быстрое восстановление прежнего возбуждения, что достигается инверторным режимом преобразователя с отдачей энергии поля в сеть.

Пуск синхронного двигателя в асинхронном режиме получается проще и надежнее при полупроводниковом управлении разрядным резистором. Контактёр возбуждения M (рис. 4-4) с защелкой и перекрытием замыкающего и размыкающего контактов заменяется на диод D и тиристор T . Во время пуска синхронного двигателя тиристоры T_1, T_2 закрыты, а тиристор T открыт и вместе с диодом D позволяет протекать переменному току, индуктированному в обмотке возбуждения. При подсинхронной частоте вращения включаются тиристоры T_1, T_2 , выключается тиристор T и двигатель входит в синхронизм.

В этой схеме обмотка возбуждения всегда подключена к разрядному резистору диодом D , что дает надежную защиту ее от перенапряжений.

Сопротивление разрядного резистора $r_{\text{разр}}$ рассчитывается, как приведено в § 4-4, исходя из условий повышения пускового или входного момента, с учетом быстрого гашения поля при коротких замыканиях фаз статора.

Для того чтобы при отключениях обмотки возбуждения не пробивало возникающим напряжением тиристоры моста и не создавался при этом обходный низкоомный контур, замедляющий гашение поля, тиристоры выбираются с номинальным напряжением, не меньшим, чем разрядное напряжение, кратность которого равна кратности сопротивления разрядного резистора, если нет форсировки по току.

Значительный практический интерес представляет простейшая схема с постоянно подключенным к обмотке возбуждения нелинейным резистором, который резко снижает свое сопротивление при увеличении на нем напряжения сверх критического.

Достоинством схемы, показанной на рис. 4-6, является полное отсутствие потерь в разрядном резисторе при синхронном режиме двигателя и возможность улучшить пусковые характеристики двигателя в асинхронном режиме.

В настоящее время получают развитие полупроводниковые возбудители отдельно стоящие, а также размещаемые на роторе синхронного двигателя, благодаря чему исключаются контактные кольца со щетками.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Динамическое торможение синхронного двигателя можно получить, если, сохранив питание обмотки возбуждения ротора, отключить статор от сети и замкнуть его на внешнее сопротивление (рис. 4-7). Двигатель будет работать генератором на внешнее сопротивление и развивать тормозной момент от взаимодействия тока статора с магнитным потоком ротора.

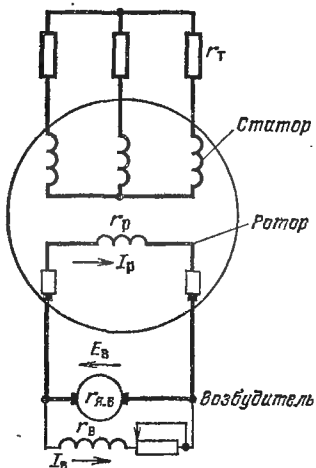


Рис. 4-7. Схема динамического торможения синхронного двигателя.

Подача тока возбуждения может производиться от отдельно стоящего возбудительного агрегата или от возбудителя, насаженного на вал синхронного двигателя. Второй способ дает слабое торможение, так как с уменьшением частоты вращения резко падает напряжение возбудителя. Возможен еще один способ торможения — подача постоянного тока в обмотки статора и гашение кинетической энергии в беличьей клетке ротора. Этот способ не находит применения потому, что он менее эффективен, чем первый, и требует установки до-

бавочного агрегата для питания статора постоянным током.

Для того чтобы рассчитать наиболее рациональное динамическое торможение двигателя, необходимо иметь семейства тормозных механических характеристик для разных сопротивлений резисторов в статоре и разных токов возбуждения ротора. А для этого нужно вначале рассчитать и построить кривые тока статора в зависимости от частоты вращения ротора.

Ниже даются способы определения токов статора при помощи диаграмм напряжения, учитывающих насыщение двигателя, падение напряжения внутри двигателя и реакцию статора.

2. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Для учета насыщения двигателя используется кривая намагничивания. Такая кривая относительных значений дана на рис. 4-8, она может применяться с некоторым приближением как универсальная для синхронных двигателей. За единицу э. д. с. принято номинальное фазное напряжение $U_{ф.с.н} = U_{с.в}/\sqrt{3}$, а за единицу тока возбуждения ротора — значение $I_{р.н.х}$, которое необходимо для получения при холостом ходе (разомкнутом статоре) и синхронной частоте вращения номинального напряжения на статоре.

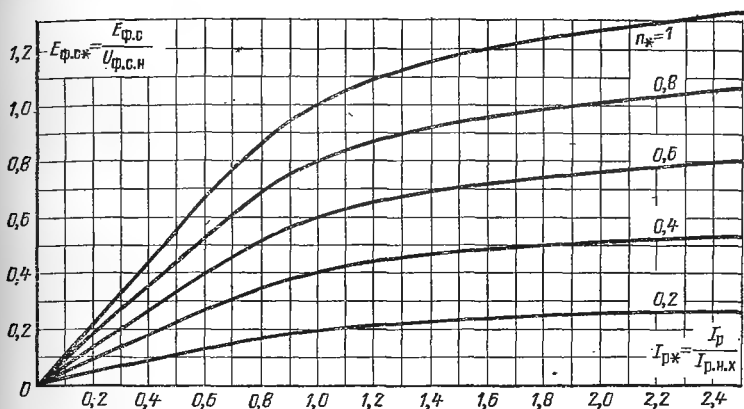


Рис. 4-8. Кривые намагничивания синхронного двигателя типа МС-325-12/12, 6000 В, 8000 кВт·А, 6150 кВт, 500 об/мин, $\cos \varphi_{оп} = 0,8$, $I_{р.н} = 408$ А, $I_{р.н.х} = 211$ А.

Для облегчения расчетов на рис. 4-8 показаны еще кривые намагничивания при частотах вращения, меньших единицы, т. е. $n_* = 0,2$; $0,4$ и т. д.

Учет размагничивающего действия м. д. с. статора

$$F'_a = \frac{0,9 k_{об} m \omega_c I_c}{2 p \omega_p} \quad (4-13)$$

производится путем разложения ее (рис. 4-9) на продольную составляющую

$$F'_{ad} = k_d F'_a \sin \psi \quad (4-14)$$

и поперечную составляющую

$$F'_{aq} = k_q F'_a \cos \psi. \quad (4-15)$$

Здесь штрихи над обозначениями м. д. с. обозначают приведенные значения к ротору. Приведение к ротору необходимо для использования кривой намагничивания двигателя; k_d, k_q — коэффициенты, учитывающие уменьшение продольной и поперечной м. д. с. статора воздушными промежутками между полюсами (рис. 4-10) [Л. 6]. При неявнополюсной машине $k_d = k_q = 1$; $k_{об}$ — обмоточный коэффициент статора (часто $k_{об} = 0,9$); m — число фаз статора (обычно $m = 3$); ω_c, ω_p — числа витков фазы статора и

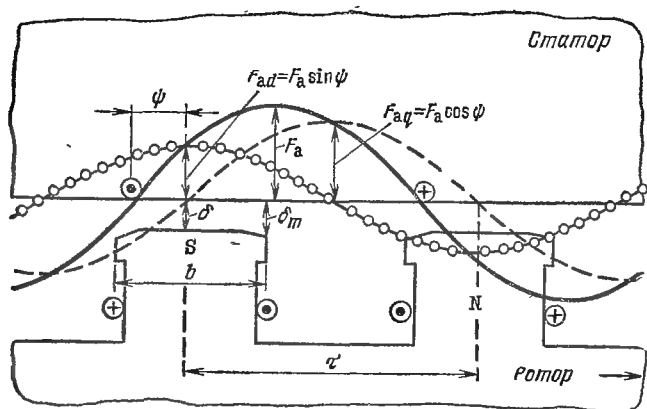


Рис. 4-9. Разложение м. д. с. статора F_a на продольную F_{ad} и поперечную F_{aq} .

полюса ротора; $2p$ — число полюсов ротора; ψ — угол сдвига между э. д. с., индуцируемой потоком ротора, и током статора.

На рис. 4-11 показано построение диаграммы напряжений, в которой угол сдвига между напряжением и током статора принят равным нулю, т. е. $\varphi = 0$, так как торможение производится при активном внешнем сопротивлении.

Определение тока статора I_c основано на методе подбора. Ниже приводится порядок расчета и построения диаграммы напряжений, при этом опускается теория, известная из курсов электрических машин. Расчет ведем в общем виде для некоторой относительной частоты вращения n_* .

1. Задаемся предположительно током I_c , определяем падение напряжения $I_c R_c$ цепи статора от активного сопротивления (внутреннего + внешнего) и откладываем его по горизонтальной оси тока Oa на рис. 4-11, а.

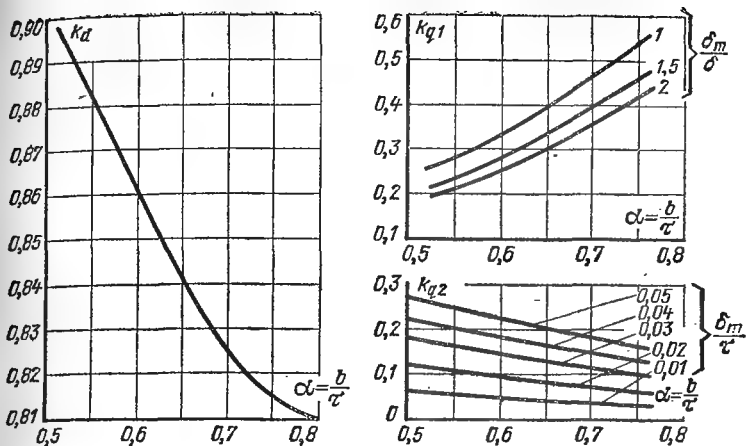


Рис. 4-10. Коэффициенты, учитывающие уменьшение продольной (k_d) и поперечной ($k_q = k_{q1} + k_{q2}$) м. д. с. статора воздушными промежутками между полюсами.

b — полюсная дуга; τ — полюсный шаг; δ — зазор под серединой полюса; δ_m — зазор под краем полюса.

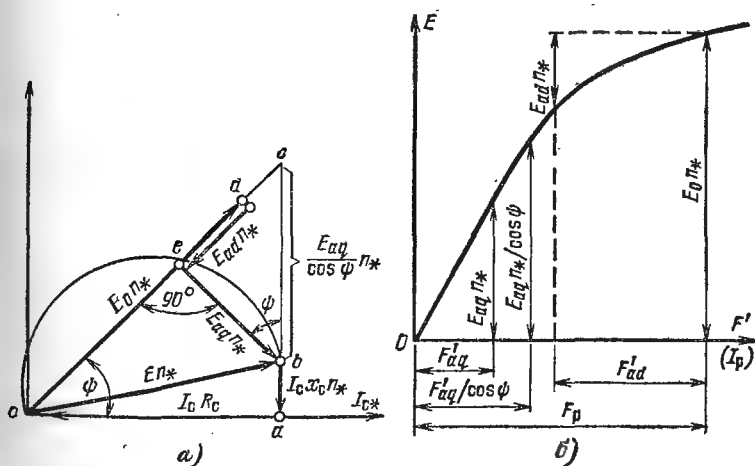


Рис. 4-11. Определение тока I_c статора при помощи диаграммы напряжений.

а — диаграмма напряжений при относительной частоте вращения n_* ; б — кривая намагничивания при относительной частоте вращения n_* .

2. Откладываем вверх падение напряжения $I_c x_c n_*$ от реактивного сопротивления цепи статора для данной отнoсительной частоты вращения n_* . Полученная гипотенуза $E n_*$ есть э. д. с. синхронного двигателя.

3. Определяем м. д. с., приведенную к току ротора [(4-15) и (4-13)]:

$$\frac{F'_{aq}}{\cos \psi} = k_q \frac{0,9 k_{об} m \omega_c}{2 p \omega_p} I_c = a I_c$$

или по отношению к $I_{p.н.х}$

$$\left(\frac{F'_{aq}}{\cos \psi} \right)_* = a \left(\frac{I_{c.н}}{I_{p.н.х}} \right) I_{c*}$$

4. По кривой намагничивания (рис. 4-11, б) при данной частоте вращения n_* находим для $F'_{aq}/\cos \psi$ соответствующую э. д. с. $\frac{E_{aq}}{\cos \psi} n_*$, которую откладываем вверх (bc).

5. Проводя луч $Ос$, получим направление э. д. с. холостого хода $E_0 n_*$, которую откладываем (Od). Эту э. д. с. определяем по м. д. с. ротора F_p (или току ротора I_p).

При отсутствии подробных данных направление вектора э. д. с. $E_0 n_*$ можно еще задать, зная синхронное поперечное реактивное сопротивление x_q , как сказано ниже [см. рис. 4-15].

6. Восстанавливая перпендикуляр из точки b на вектор $E_0 n_*$, получаем э. д. с. $E_{aq} n_*$ от поперечной м. д. с. F'_{aq} , которую найдем по кривой намагничивания.

7. Определяем м. д. с. продольной составляющей статора из (4-14) и (4-15):

$$F'_{ad} = F'_{aq} \frac{k_d}{k_q} \operatorname{tg} \psi = F'_{aq} \frac{k_d}{k_q} \frac{ec}{be} = F'_{aq} \frac{k_d}{k_q} \frac{ac}{Oa},$$

для которой найдем из кривой намагничивания $E_{ad} n_*$ путем вычитания $F_p - F'_{ad}$.

8. Вычитаем из $E_0 n_*$ э. д. с. $E_{ad} n_*$, т. е. откладываем ее влево, вниз от точки d , и получаем точку e .

Если правильно был принят ток статора I_c , то конец вектора $E_{ad} n_*$ совпадает с началом вектора $E_{aq} n_*$ в точке e перпендикуляра be . Если же он не доходит или переходит эту точку, необходимо задаться другим значением I_c , соответственно уменьшенным или увеличенным, и снова произвести построения.

Повторные построения облегчаются тем, что направления лучей $E n_*$ (т. е. Ob) и $E_0 n_*$ (т. е. Od) сохраняются.

Для данного двигателя направления лучей зависят от сопротивления R_c и частоты вращения n_* и определяются R_c и $x_c n_*$ (см. рис. 4-14).

После правильного подбора I_c строится новая диаграмма для другой относительной частоты вращения n_* и т. д.

Как видно из построений рис. 4-11, диаграмма напряжений синхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, имеет следующую физичес-

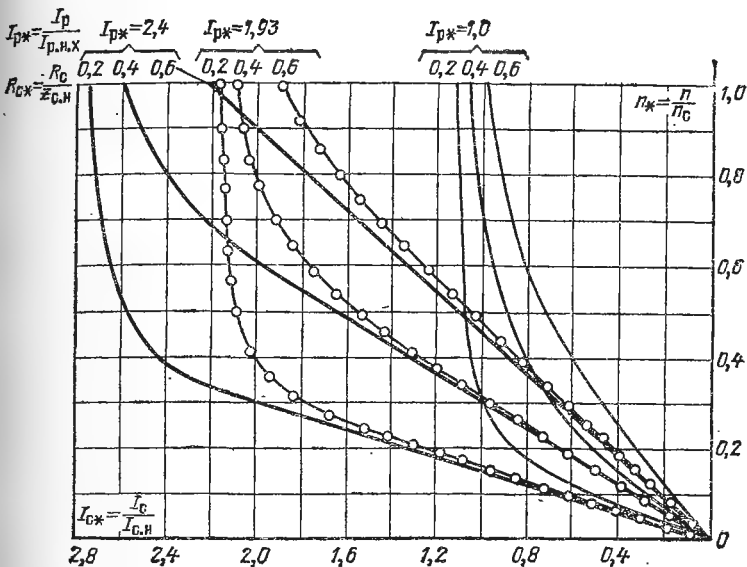


Рис. 4-12. Кривые тока статора I_c при динамическом торможении синхронного двигателя для разных токов ротора I_p и сопротивлений R_c цепей статора.

кую основу: э. д. с. холостого хода для принятого тока возбуждения ротора и при данной частоте вращения ротора уравнивается противодействующими ей активным и реактивным падениями напряжения в цепи статора и э. д. с. от поперечной и продольной м. д. с. статора, т. е.

$$\dot{E}_0 n_* = \dot{I}_c R_c + \dot{I}_c x_c n_* + \dot{E}_{aq} n_* + \dot{E}_{ad} n_*.$$

На рис. 4-12 даны рассчитанные указанным выше способом кривые тока статора при динамическом торможении синхронного двигателя типа МС-325-12/12, 6000 В, 8000 кВт·А, 6150 кВт, 500 об/мин, $I_{p,n} = 408$ А при опережающем

$\cos\varphi = 0,8$, $I_{p.n.x} = 211$ А, $\omega_c = 72$ витка, $\omega_p = 54,5$ витка, $r_{c*} = 0,00534$, $x_{c*} = 0,0955$, $x_{q*} = 0,6755$, $x_{d*} = 1,1355$, $\delta = 12$ мм, $\delta_m = 15,6$ мм, $b = 455$ мм, $\tau = 607$ мм.

По этим токам рассчитаны механические характеристики (рис. 4-13) при помощи формулы, аналогичной (3-37):

$$M = 28,6 \frac{I_c^2 R_c}{n}, \quad (4-16)$$

где M — момент двигателя, Н·м; I_c и R_c — ток, А, и сопротивление цепи статора, Ом; $n = n_* n_c$ — частота вращения ротора, об/мин.

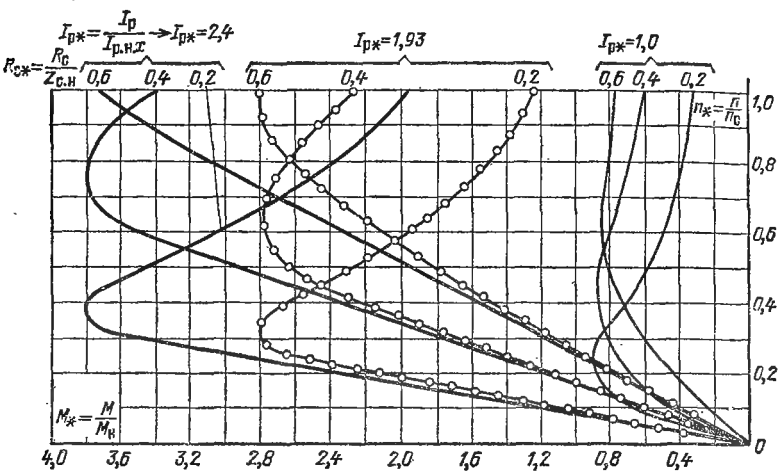


Рис. 4-13. Механические характеристики синхронного двигателя при динамическом торможении с отдельно стоящим возбудителем.

Все расчеты и построения удобнее вести в относительных значениях, принимая за единицу:

- $U_n/\sqrt{3}$ — фазное номинальное напряжение статора, В;
- $I_{p.n.x}$ — ток возбуждения ротора, вызывающий при холостом ходе с синхронной частотой вращения номинальное напряжение статора, А;
- $I_{c.n}$ — номинальный ток статора, А;
- $z_{c.n}$ — номинальное сопротивление статора, Ом;
- M_n — номинальный момент двигателя, Н·м;
- n_c — синхронная частота вращения, об/мин.

Формула (4-16) может быть переписана:

$$M_* M_n = 28,6 \frac{(I_{c*} I_{c.n})^2 R_{c*} z_{c.n}}{n_* n_c}$$

или

$$M_* = \frac{28,6 I_{c.н}^2 z_{c.н}}{M_{Hn_c}} \frac{(I_{c*})^2 R_{c*}}{n_*} = \frac{9550}{M_{Hn_c}} \frac{3 I_{c.н}^2 z_{c.н}}{1000} \frac{(I_{c*})^2 R_{c*}}{n_*},$$

откуда получим окончательно:

$$M_* = \frac{P_{H(кВ \cdot А)}}{P_{H(кВт)}} \frac{(I_{c*})^2 R_{c*}}{n_*}. \quad (4-17)$$

Приведенные здесь характеристики тока статора и момента двигателя в относительных значениях (рис. 4-12 и 4-13) могут быть использованы с некоторым приближением и для других синхронных двигателей.

Характеристики тока статора нужны для выбора резисторов динамического торможения по нагреву.

Заметим, что при выборе добавочного резистора и тока возбуждения ротора нельзя забывать, что ток статора не должен быть больше допускаемого заводами-изготовителями для пусковых условий.

Рисунок 4-12 подтверждает очевидный закон: ток статора тем больше, чем больше ток возбуждения ротора и чем меньше сопротивление цепи статора.

На приведенных характеристиках относительный ток ротора $I_{p*} = 1,93$ соответствует номинальному току возбуждения синхронного двигателя, работающего в номинальном режиме, т. е. при номинальной мощности и опережающем $\cos \varphi = 0,8$.

Механические характеристики рис. 4-13 показывают, что динамическое торможение с этим током возбуждения является вполне удовлетворительным для большинства случаев, так как обеспечивает максимальные моменты $M_* \approx \approx 2,8$. Наиболее благоприятные механические характеристики соответствуют полному активному сопротивлению цепи статора $R_{c*} = 0,4 \div 0,6$.

Характеристика при $R_{c*} = 0,6$ дает меньший путь торможения, так как обеспечивает больший момент при высокой частоте вращения, тогда как характеристика $R_{c*} = 0,4$ может дать меньшее время торможения из-за лучшего заполнения кривой момента.

Форсировка тока возбуждения (например, $I_{p*} = 2,4$) дает значительное увеличение тормозного момента. Однако следует учитывать, что запаздывание нарастания магнитного потока приведет к некоторому запаздыванию роста момента. Кроме того, нельзя забывать и здесь, что при при-

3. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНОСТЕЙ

На рис. 4-14 показана диаграмма напряжений с добавочными построениями, причем взят частный случай, когда $n_* = 1$.

$$ac = \frac{E_{aq}}{\cos \psi} + I_c x_c = I_c x_q,$$

а отрезок ag — как падение напряжения от условного синхронного продольного реактивного сопротивления

$$ag = \frac{E_{ad}}{\sin \psi} + I_c x_c = I_c x_d.$$

Очевидно, что направление луча E_0 (луч Od) определяется отношением x_q/R_c , а луча Og — отношением x_d/R_c . Поэтому если из конца вектора E_0 , определенного по кривой намагничивания для принятого тока возбуждения ротора, провести перпендикуляр dg (касательную) до пересечения с лучом Og и затем опустить из полученной точки g перпендикуляр на ось тока статора, то отрезок $Oa = I_c R_c$ даст искомый ток статора $I_c = Oa/R_c$.

Подобное построение дано на рис. 4-15 в общем случае при относительной частоте вращения n_* , при синхронном продольном реактивном сопротивлении $x_{d\text{нас}}$ для насыщенного двигателя и без промежуточных построений, которые служили нам для доказательства.

Необходимо обратить внимание на то, что заводами, изготавливающими электрические машины, даются x_d и x_q для ненасыщенных двигателей. Для неявнополюсных машин $x_d = x_q$, для явнополюсных $x_q \approx 0,6 x_d$, причем для разных явнополюсных машин $x_{d*} \approx 0,7 \div 1,8$, а $x_{q*} \approx 0,5 \div 1,1$.

Синхронное поперечное реактивное сопротивление практически не зависит от насыщения, так как поток от поперечной м. д. с. статора проходит главным образом через воздушный промежуток.

Но синхронное продольное реактивное сопротивление зависит в сильной степени от насыщения, потому что поток продольной м. д. с. статора проходит главным образом через магнитную систему, притом уже насыщенную полем ротора.

На рис. 4-16 даны кривые относительного синхронного продольного реактивного сопротивления $x_{d\text{нас}}/x_d$, которые показывают, что оно зависит не только от насыщения (ток I_{p*}), но и от активного сопротивления цепи статора R_c и от частоты вращения n_* , так как последние определяют в некоторой степени угол между E_0 и I_c .

Эти кривые рассчитаны для двигателя МС-325-12/12, 6000 В, 8000 кВт·А, 500 об/мин следующим образом: токи по рис. 4-12, рассчитанные при помощи диаграммы напряжений, были приняты как действительные. Затем при помощи построений по рис. 4-15 были найдены такие значе-

ния $x_{d\text{нас}}$, которые обеспечили бы те же токи статора при тех же частотах вращения ротора.

Как следует из кривых рис. 4-16, при ненасыщенном двигателе $I_{p*} \leq 0,65$ имеем $x_{d\text{нас}} = x_d$, а при токе возбуждения $I_{p*} = 1,93$, соответствующем опережающему $\cos \varphi = 0,8$ при номинальной мощности, $x_{d\text{нас}} = (0,2 \div 0,6)x_d$ в зависимости от R_c и n_* .

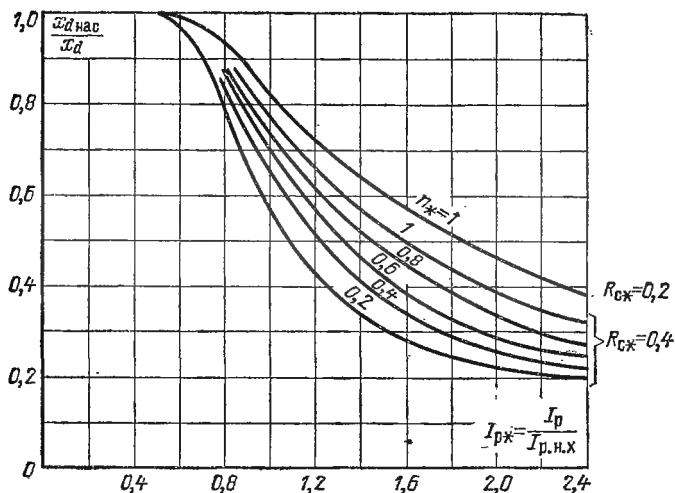


Рис. 4-16. Средние кривые относительного синхронного продольного реактивного сопротивления синхронного двигателя.

Кривыми рис. 4-16 можно пользоваться с некоторым приближением для двигателей с кривой намагничивания, близкой к кривой рис. 4-8. Таким образом, для определения тока статора I_c по данным I_p , R_c и n_* нужно вначале найти $x_{d\text{нас}}$ по кривым рис. 4-16 и затем выполнить построения согласно рис. 4-15. Затем по (4-16) или (4-17) определить моменты двигателя.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗБУДИТЕЛЕМ НА ВАЛУ

В ряде случаев для быстроходных синхронных двигателей не ставится отдельный возбуждательный агрегат, а синхронные двигатели поставляются с возбуждителем на общем валу и с самовозбуждением. Динамическое торможение от

такого спаренного возбудителя неэффективно, хотя при синхронной частоте вращения мы можем получить такой же начальный момент, как и при отдельно стоящем возбудительном агрегате. Но далее при снижении частоты вращения будет быстро падать ток возбуждения ротора за счет понижения э. д. с. от снижения частоты вращения и от уменьшения тока в обмотке возбуждения возбудителя.

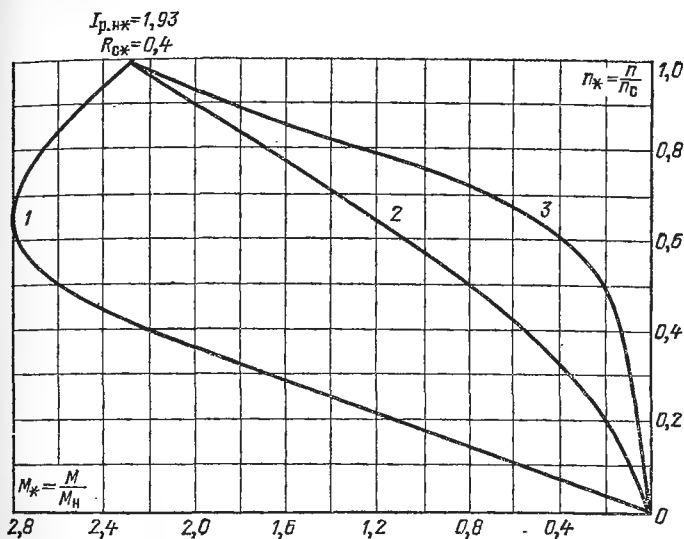


Рис. 4-17. Механические характеристики синхронного двигателя при динамическом торможении.

1 — отдельно стоящий возбудитель; 2 — возбудитель на валу синхронного двигателя с независимым возбуждением; 3 — возбудитель на валу синхронного двигателя с самовозбуждением.

На рис. 4-17 даны механические характеристики динамического торможения уже рассмотренного синхронного двигателя типа МС-325-12/12 при начальном токе возбуждения $I_{p.n*} = 1,93$ и $R_{c*} = 0,4$ (кривая 3).

Эта характеристика дает быстрое снижение частоты вращения до $0,7 n_c$, но дальнейшее замедление может быть очень длительным.

Можно улучшить тормозные характеристики, если дать возбудителю независимое возбуждение. Тогда для тех же начальных условий, что и с самовозбуждением, мы получим характеристику 2. Но и эта характеристика дает большой спад момента,

Очевидно, что при надобности в эффективном динамическом торможении следует заказывать синхронный двигатель с отдельно стоящим возбудительным агрегатом (кривая 1).

Тормозные характеристики синхронного двигателя с возбудителем на валу с самовозбуждением рассчитываются так же как с отдельно стоящим возбудительным агрегатом, но

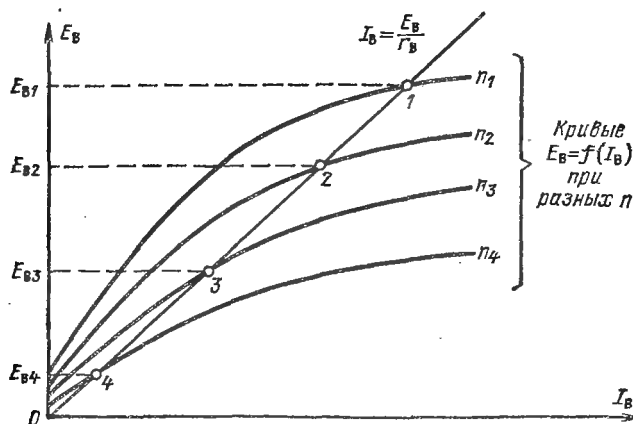


Рис. 4-18. Определение э. д. с. возбудителя E_B при самовозбуждении для разных частот вращения: n_1, n_2, n_3, n_4 .

здесь для каждой частоты вращения нужно определять свой ток ротора I_p по э. д. с. возбудителя E_B (рис. 4-7), т. е.

$$I_p = \frac{E_B}{r_p + r_{я.в}},$$

где r_p и $r_{я.в}$ — сопротивления ротора двигателя и якоря возбудителя.

Для определения E_B строим ее зависимость от тока возбуждения I_B , т. е. кривую намагничивания $E_B = f(I_B)$ при данной частоте вращения (рис. 4-18). Затем строим зависимость тока возбуждения от э. д. с., т. е. $I_B = \varphi(E_B) = E_B / r_B$. Пересечение этих двух кривых даст нам для данной частоты вращения искомую э. д. с. возбудителя.

Так, при частотах вращения n_1, n_2, n_3, n_4 получим соответственно точки 1, 2, 3, 4 и э. д. с. возбудителя $E_{B1}, E_{B2}, E_{B3}, E_{B4}$.

Заметим, что на кривой 3 рис. 4-17 не получается полного срыва момента синхронного двигателя при снижении частоты вращения, как можно было бы предполагать.

Небольшой тормозной момент, постоянно убывающий, сохраняется до нулевой частоты вращения благодаря остаточному магнетизму возбудителя и остаточному полю полюсов синхронного двигателя.

При независимом возбуждении возбудителя на валу синхронного двигателя ток ротора для каждой частоты вращения ротора определяется очень просто: ток ротора меняется пропорционально частоте вращения.

Пример 4-1. Рассчитать сопротивление резистора динамического торможения для синхронного двигателя типа СМ-5200-1000, 6000 В, 5200 кВт·А, 1000 об/мин, $I_{с.н} = 500$ А, $\cos \varphi = 0,8$ опережающий, сопротивление фаз статора, соединенных в звезду, $r_c = 0,03$ Ом. По принятой схеме торможение производится при токе возбуждения 402 А, соответствующем кратности 1,9 $I_{р.н.х.}$, т.е. при токе, вызывающем при холостом ходе ротора с синхронной частотой вращения номинальное напряжение статора. Питание ротора производится от отдельно стоящего возбудительного агрегата. Требуется быстрое торможение во времени.

Решение. Поскольку требуется быстрое торможение во времени, а не минимальный путь торможения, можно не иметь большого начального тормозного момента при высокой частоте вращения, но должно быть хорошее заполнение площади, ограниченной кривой момента. Согласно рис. 4-13 при $I_p = 1,93$ такое хорошее заполнение площади момента обеспечивает характеристика, соответствующая $R_{с*} = 0,4$.

Номинальное сопротивление статора

$$z_{с.н} = \frac{U_{с.н}}{\sqrt{3} I_{с.н}} = \frac{6000}{3 \cdot 500} = 6,93 \text{ Ом.}$$

Полное активное сопротивление каждой фазы статора

$$R_c = R_{с*} z_{с.н} = 0,4 \cdot 6,93 = 2,77 \text{ Ом.}$$

Искомое сопротивление секций резистора динамического торможения, включенных в каждую фазу статора,

$$r_T = R_c - r_c = 2,77 - 0,03 = 2,74 \text{ Ом.}$$

Зная статический момент и маховой момент привода, можно при помощи формул § 1-1 рассчитать время торможения.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РЕЗИСТОРЫ

В предшествующих главах были даны способы расчета сопротивлений добавочных резисторов в цепях двигателя. Это есть решение только первой части задачи, самой сложной и ответственной.

Данная глава посвящена второй части задачи, которая доводит ее до практического завершения и состоит в выборе резисторов и составлении схем резисторов.

Резисторы должны быть выбраны экономично по затратам активного материала и не должны перегреваться, что решается тепловым расчетом,

Ток, проходя через тело, создает тепловую энергию. Часть этой энергии накапливается в теле и вызывает повышение его температуры, другая часть отдается в окружающую среду. Если тепло создается равномерно во времени, то при некоторой температуре наступит баланс между количеством теплоты, создаваемой и отдаваемой, и возрастание температуры прекратится.

Рассмотрим вначале характеристики изменения температуры идеального тела при различных условиях. Идеальным телом будем считать такое, у которого:

- а) теплопроводность бесконечно велика и поэтому оно имеет одинаковую температуру во всех точках объема;
- б) теплоотдача со всей поверхности равномерна;
- в) теплоемкость и теплоотдача тела постоянны;
- г) теплоотдача пропорциональна разности температур между телом и окружающей средой;
- д) температура окружающей среды постоянна и не изменяется с повышением температуры тела.

Очевидно, что приведенные условия требуют идеальности не только от самого тела, но и от окружающей среды.

Исходя из того, что созданная теплота равна накопленной плюс отданной, выведено известное уравнение теплового состояния идеального тела при равномерном во времени нагревании:

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T}, \quad (5-1)$$

где τ , τ_0 , τ_y — превышения температуры тела, °С, над окружающей средой соответственно через t , с, после начала, вначале и установившееся; T — постоянная времени нагрева, с; e — неперово число.

Значение τ_y определяется:

$$\tau_y = Q/A, \quad (5-2)$$

где Q — количество теплоты, Дж, создаваемой в теле в 1 с; A — теплоотдача, т. е. количество теплоты, отдаваемой телом со всей поверхности в 1 с, при разности температур между телом и окружающей средой в 1°С.

Очевидно, что установившееся превышение температуры тела над окружающей средой не зависит от его теплоемкости, пропорционально количеству создаваемой теплоты в единицу времени и обратно пропорционально теплоотдаче тела.

Постоянная времени T определяется:

$$T = C/A, \quad (5-3)$$

где C — теплоемкость тела, т. е. количество теплоты в джоулях, необходимой для изменения температуры тела на 1°С.

Постоянная времени имеет большое практическое значение при рассмотрении вопросов нагрева резисторов. Выясним ее физический смысл.

Умножив числитель и знаменатель равенства (5-3) на τ_y , получим в числителе $C\tau_y$ — количество теплоты, накопленной в теле при нагревании от 0°С до τ_y ; в знаменателе $A\tau_y$ — количество теплоты, отдаваемой в окружающую среду в 1 с, при установившейся температуре, равное Q — теплоте, создаваемой в теле в 1 с. Поэтому очевидно, что

постоянная времени представляет собой время, в течение которого тело нагревается от температуры окружающей среды до реальной установившейся (определяемой $\tau_y = Q/A$) при равномерном выделении в нем теплоты и при отсутствии отдачи теплоты вовне.

Из (5-3) следует, что постоянная времени не зависит от количества теплоты, создаваемой в теле в единицу времени, пропорциональна теплоемкости и обратно пропорциональна теплоотдаче.

Таким образом, постоянная времени тела определяется его свойствами и окружающей средой, а также формой и размерами тела.

При увеличении геометрических размеров тела теплоемкость растет пропорционально объему, а теплоотдача — пропорционально поверхности, поэтому постоянная времени растет пропорционально первой степени линейных размеров тела. Другими словами, из двух геометрически подобных и физически однородных тел большее по размерам имеет большую постоянную времени.

Зная τ_0 , T и определяя $\tau_y = Q/A$, можно, задаваясь различными временами t , определить соответствующие τ и по точкам построить кривую.

На рис. 5-1 дана кривая нагрева, рассчитанная по (5-1) для частного случая $\tau_0 = 0$, т. е. если в начальный момент времени тело имеет температуру окружающей среды. Вначале температура тела возрастает быстро, затем рост ее замедляется и она постепенно при-

ближается к установившейся температуре, соответствующей τ_y . Теоретически установившаяся температура будет достигнута через бесконечно большое время. По прошествии времени нагрева $4T$, начиная от холодного состояния, превышение температуры тела будет меньше установившегося всего лишь на 2%. Для практических расчетов точность 2% является достаточной, и поэтому можно считать, что тело достигает установившейся температуры через время $t = 4T$.

Согласно (5-2) установившаяся температура для данного тела будет тем больше, чем больше теплоты создается в теле в единицу времени. В качестве иллюстрации на рис. 5-2, а показаны кривые нагрева для одного тела при двух различных тепловыделениях.

Представим теперь себе разные тела с одинаковой теплоотдачей A и одинаковым количеством теплоты, создаваемой в единицу времени Q , но с различными постоянными времени. Установившаяся температура тел будет одинакова, но скорость нарастания температуры будет больше у того тела, которое имеет меньшую постоянную времени, как показано на рис. 5-2, б.

Показанные на рис. 5-2 кривые нагрева справедливы также в тех случаях, когда до нагрева тело имело превышение температуры τ_0 . В этих случаях рассмотрение кривых должно производиться начиная с этого превышения температуры и нуль времени должен быть соответственно смещен вправо.

Уравнение теплового состояния (5-1) является общим и для нагрева и для охлаждения. Если количество теплоты, создаваемой в еди-

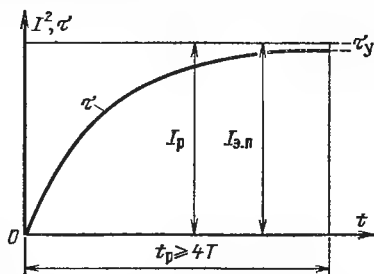


Рис. 5-1. Кривая нагрева тела начиная от холодного состояния (т. е. $\tau_0 = 0$).

ницу времени, таково, что $\tau_y > \tau_0$, будем иметь нагрев, если же $\tau_y < \tau_0$ — охлаждение. Нетрудно показать, что кривые охлаждения являются зеркальными отображениями кривых нагрева, если поменять начальные и конечные условия.

Условия нагрева реальных резисторов при протекании по ним тока несколько отличаются от рассмотренных для идеального тела. Отличия состоят в следующем:

а) Теплопроводность материала резисторов не бесконечно велика, и поскольку образование тепла происходит приблизительно равномерно по всему объему, а охлаждение — только с поверхности, последняя имеет меньшую температуру, чем внутренние точки объема. В начале нагрева эта разница очень мала, но с возрастанием температуры увеличивается. Это приводит к снижению отдачи теплоты по сравнению с идеальным телом.

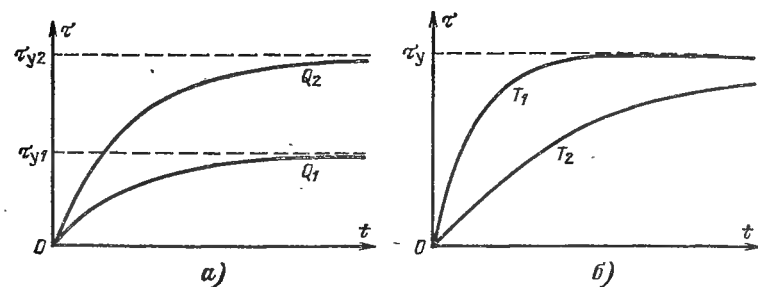


Рис. 5-2. Кривые нагрева тела начиная от холодного состояния.

а — для одного тела при различном количестве теплоты, создаваемой в единицу времени, $Q_2 > Q_1$; б — для двух тел с одинаковыми Q и A , но различными постоянными времени $T_2 > T_1$.

б) Теплоотдача происходит неравномерно со всей поверхности резисторов вследствие различий в окружающей среде: отдельные участки резистора неодинаково омываются воздухом; элементы резистора, излучая энергию, воздействуют на соседние.

в) Теплоемкость резистора не постоянна, а немного возрастает с увеличением температуры.

г) Известно, что лишь теплота, отводимая путем теплопроводности, пропорциональна разности температур в первой степени; теплота, отводимая конвекцией, пропорциональна приблизительно разности температур в степени 1,25; что же касается лучеиспускания, то оно пропорционально разности четвертых степеней абсолютных температур. Исходя из этого действительное количество отводимой теплоты должно с увеличением температуры резистора возрастать быстрее, чем принято при рассмотрении нагрева идеального тела.

д) С увеличением температуры резистора окружающий его воздух несколько нагревается и это уменьшает теплоотдачу по сравнению с рассмотренной выше для идеального тела.

Из перечисленных выше факторов основными по значимости являются два последних, при этом ухудшение теплоотдачи за счет увеличения температуры окружающей среды несколько компенсируется улучшением отдачи за счет лучистой энергии и конвекции.

Учесть все приведенные выше факторы, влияющие на нагрев резисторов и опущенные при рассмотрении нагрева идеального тела, не представляется возможным ввиду сложности явлений.

Ошибка для практических условий получается небольшой, и потому законы, выведенные для идеального тела, могут быть применены для реальных резисторов.

5-2. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ ТОКИ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОВ В РЕЗИСТОРАХ

Тепловой расчет резисторов сводится к определению для них неизменного длительного тока, вызывающего такое же превышение температуры сверх окружающей, что и реальный меняющийся ток.

Представим себе двигатель смешанного возбуждения, управляемый по схеме рис. 2-68 (левой), с двумя ступенями ускорения и одной ступенью динамического торможения. Подобные схемы применяются для кривошипных приводов с циклическим режимом работы.

При пуске двигателя кривошип приходит во вращение и производит работу, после поворота кривошипа на 360° привод возвращается в исходное положение и останавливается динамическим торможением. Через некоторые паузы, определяемые технологическим процессом, циклы повторяются.

Имея кривую статического момента в функции угла поворота кривошипа и характеристики двигателя (рис. 2-68), можно по (1-13) рассчитать и построить график изменения момента двигателя в функции времени. Примерный график для одного цикла представлен на рис. 5-3, а; он может быть известен и из расчетов мощности двигателя.

Из схемы рис. 2-68 видно, что отдельные секции резистора неодинаково обтекаются током на протяжении цикла работы привода. Диаграммы рис. 5-3, б — г дают характеристики изменения тока в функции времени для каждой секции резистора.

При пуске ток протекает лишь через ступени пускового резистора r_1 и r_2 . Токи в них легко определяют по диаграмме моментов, пользуясь для перевода моментов в токи естественной характеристикой двигателя $M = f(I)$.

При динамическом торможении обтекается током только секция резистора r_T .

Вначале приведем меняющиеся во времени токи к неизменным эквивалентным по превышению температуры токам на протяжении тех же

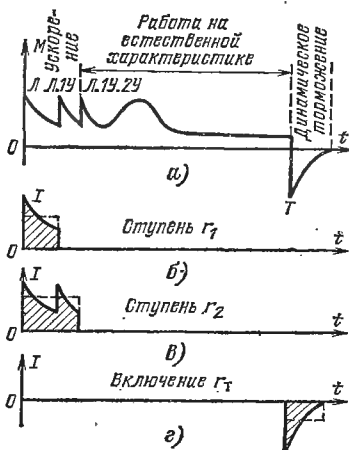


Рис. 5-3. График момента двигателя и токов в ступенях резистора согласно схеме рис. 2-68.

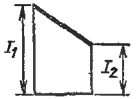
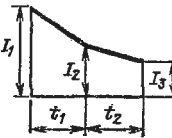
рабочих периодов. Для обычных условий, когда время протекания тока через секции резистора мало по сравнению с их постоянной времени T (составляет сотые доли), можно с достаточной для практических расчетов точностью считать, что конечное превышение температуры за время рабочего периода при меняющемся токе будет то же, что при неизменном, если в обоих случаях выделится одинаковое количество теплоты. Другими словами, если отношение рабочего периода меняющегося тока к постоянной времени мало, можно считать эквивалентный по превышению температуры ток $I_{э.п}$ (т. е. по температуре сверх окружающей) на протяжении рабочего периода приблизительно равным эквивалентному по выделенной теплоте току $I_{э.т}$.

Эквивалентный по теплоте ток на протяжении рабочего периода может быть найден построением кривой квадратов тока, планиметрированием площади, ею образованной, и делением площади на время рабочего периода. Его можно определить также по заданной кривой изменения тока во времени, принимая отдельные небольшие участки тока за прямолинейные.

В табл. 5-1 даны легко выводимые формулы для определения эквивалентного по теплоте тока при разбивке кривой тока на один и два участка.

Таблица 5-1

Эквивалентные значения токов по теплоте

$I_{э.т} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}}$	
$I_{э.т} = \sqrt{\frac{(I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2) t_1 + (I_2^2 + I_3^2 + I_2 I_3) t_2}{3(t_1 + t_2)}}$	

Основываясь на очевидной из приведенной таблицы закономерности, легко написать формулу эквивалентного по теплоте тока для любого числа участков.

При помощи этих формул можно преобразовать диаграммы рис. 5-3, б — г в эквивалентные прямоугольные, показанные пунктиром.

Далее токи в каждой секции резистора нужно привести к эквивалентному постоянному продолжительному току, как дано ниже.

Закономерные режимы тока в резисторах можно классифицировать следующим образом.

Продолжительный режим — рабочий период настолько велик, что температура резистора практически достигает своего установившегося значения.

Кратковременный режим — рабочий период мал и температура резистора не успевает достигнуть практически установившегося значения, а пауза настолько велика, что до возобновления нагрузки превышение температуры практически становится равным нулю.

Повторно-кратковременный режим — рабочие периоды чередуются с паузами так, что ни в одном из рабочих периодов или пауз температура резистора не достигает практически установившегося значения.

Переключающийся режим — резистор длительно нагружен, но нагрузка периодически меняется, при этом температура резистора ни при одной из нагрузок не достигает практически установившегося значения.

2. РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ТОКОВ

Из всех приведенных выше режимов переключающийся является наиболее общим. Сначала рассмотрим этот режим, чтобы воспользоваться полученными выводами для других режимов, как для частных случаев.

Для удобства сопоставления характеров изменения тока и превышений температуры рассматриваемых ниже режимов выбран масштаб для превышения температуры таким, чтобы ее максимальное установившееся значение совпадало с максимальным током. Поскольку превышение температуры пропорционально потерям энергии (5-2), на графиках показаны квадраты тока.

Предварительно рассмотрим ряд общих положений.

Для изменяющегося во времени тока применяются три эквивалента: 1) средний ток, 2) средний квадратичный ток и 3) эквивалентный по превышению температуры ток.

Средний ток — это неизменный ток, при котором через резистор пройдет за рассматриваемый промежуток времени t_B такое же количество электричества, как и при данном изменяющемся токе.

Поэтому средний ток

$$I_{cp} = \frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} i dt.$$

Средний квадратичный ток — это неизменный ток, который за рассматриваемый промежуток времени t_B образует в резисторе такое же количество теплоты, как и данный изменяющийся ток. Поэтому средний квадратичный ток будем называть *эквивалентным током по теплоте*:

$$I_{э.т} = \sqrt{\frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} i^2 dt.}$$

Эквивалентный по превышению температуры ток — это неизменный ток, который вызовет установившееся превышение температуры резистора, равное максимальному превышению температуры от действия изменяющегося тока в рассматриваемом промежутке времени. Эквивалентный по превышению температуры ток $I_{э.п}$ определяется по приведенным ниже формулам.

Как показано ниже, при любых графиках тока, проходящего через резистор, средний ток имеет наименьшее значение; больше его эквивалентный ток по теплоте и самый большой ток — эквивалентный по превышению температуры.

При определении допустимого тока для резистора мы будем пользоваться эквивалентным током по превышению температуры и лишь в некоторых случаях эквивалентным током по теплоте там, где ошибка получается небольшой, но существенно упрощается расчет.

Переключающийся режим. На рис. 5-4 показаны график тока переключающегося режима и получающаяся при этом кривая превышения температуры. При переключающемся режиме нагрузки кривые нагрева чередуются с кривыми охлаждения. После некоторого времени максимальные превышения температуры $\tau_{\max}$, так же как и минимальные $\tau_{\min}$, в смежных циклах станут равными между собой — это будет установившееся тепловое состояние при переключающемся режиме.

Превышение температуры $\tau_{\max}$ не должно быть выше допустимого для данного резистора, но и не должно быть намного меньше его,

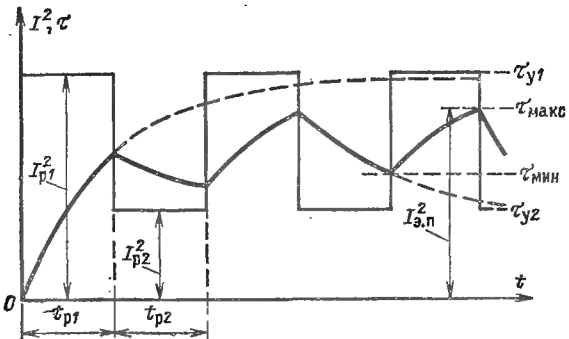


Рис. 5-4. Кривые превышений температуры резисторов при переключающемся режиме нагрузки.

так как это указывает на неэкономичное использование резистора и излишние затраты. Очевидно, что наиболее экономичным является такой выбор резистора, при котором максимальное превышение температуры совпадает с допустимым.

Найдем связь между максимальным и установившимся превышением температуры.

За период t_{p1} превышение температуры увеличится от $\tau_{\min}$ до $\tau_{\max}$, которое определится по (5-1):

$$\tau_{\max} = \tau_{y1} (1 - e^{-t_{p1}/T}) + \tau_{\min} e^{-t_{p1}/T}. \quad (5-4)$$

За период t_{p2} превышение температуры понизится от $\tau_{\max}$ до $\tau_{\min}$, которое определится по той же формуле (5-1):

$$\tau_{\min} = \tau_{y2} (1 - e^{-t_{p2}/T}) + \tau_{\max} e^{-t_{p2}/T}. \quad (5-5)$$

Подставляя $\tau_{\min}$ из (5-5) в (5-4) и выражая $\tau_{\max}$ в явном виде, получаем искомую формулу

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_{y1} \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}\right) + \tau_{y2} \left(e^{-\frac{t_{p1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}}. \quad (5-6)$$

Для выбора резистора по условиям нагрева определим эквивалентный продолжительный ток $I_{э.п.}$, который вызовет то же максимальное превышение температуры, что и данный перемежающийся. На основании (5-2) имеем:

$$\tau_{\max} = \frac{I_{э.п.}^2 r}{A}; \quad \tau_{y1} = \frac{I_{p1}^2 r}{A}; \quad \tau_{y2} = \frac{I_{p2}^2 r}{A}.$$

Подставляя эти значения в (5-6); сокращая и извлекая квадратный корень из обеих частей равенства, получаем весьма важную для расчетов формулу

$$I_{э.п.} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}\right) + I_{p2}^2 \left(e^{-\frac{t_{p1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}}}. \quad (5-7)$$

Зная для данного резистора с некоторой постоянной времени T значения I_{p1} , I_{p2} , t_{p1} , t_{p2} , можем по (5-7) определить эквивалентный по превышению температуры продолжительный ток при перемежающемся режиме.

Рациональный выбор резистора заключается в том, чтобы этот ток был как можно ближе к допускаемому для резистора продолжительному току.

Формула (5-7) дает достаточно точные результаты, однако она сложна, так как требует предварительного выбора типа и номера резистора, чтобы иметь постоянную времени T .

Для многих практических случаев, когда время цикла по отношению к постоянной времени мало, удовлетворительные результаты можно получить, если эквивалентный по превышению температуры ток определять как эквивалентный по теплоте, т. е.

$$I_{э.т.} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 t_{p1} + I_{p2}^2 t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}}. \quad (5-8)$$

Ошибка по этой формуле получается в сторону преуменьшения. Для ориентировки укажем, что в случае применения ящиков резисторов с чугунными элементами, имеющих $T = 625$ с при режиме $t_{p1} = 40$ с, $t_{p2} = 160$ с, $I_{p2} = 0,2 I_{p1}$, по (5-7) получим $I_{э.п.} = 0,505 I_{p1}$, а по формуле (5-8) $I_{э.п.} = 0,48 I_{p1}$.

На практике перемежающийся режим имеет место для постоянно включенных резисторов в силовых цепях двигателей, если нагрузка на двигатель периодически меняется, например для постоянно включенных секций резисторов маховиковых ножниц, прессов, прокатных клетей.

Повторно-кратковременный режим. На рис. 5-5 показаны графики тока повторно-кратковременного режима и получающиеся при этом кривые превышения температуры. В приведенных случаях время цикла складывается из одного рабочего периода t_p и одной паузы t_n . Отношение рабочего периода к времени цикла называют относительной продолжительностью включения и обозначают

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} \quad \text{или} \quad ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100. \quad (5-9)$$

Отсюда время цикла выразится:

$$t_p + t_n = t_p / \text{ПВ}.$$

Повторно-кратковременный режим может рассматриваться как частный случай перемежающегося, если меньший из рабочих токов снизить до нуля. Считая в (5-6) превышение температуры $\tau_{y2} = 0$, заменяя $t_{p1} + t_{p2}$ на $t_p + t_n = t_p / \text{ПВ}$ и опуская индексы 1, получаем максимальное превышение температуры для установившегося теплового состояния при повторно-кратковременном режиме:

$$\tau_{\text{макс}} = \tau_y \frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-t_p/T \cdot \text{ПВ}}} \quad (5-10)$$

Очевидно, что максимальное превышение температуры $\tau_{\text{макс}}$ для данного резистора с некоторой постоянной времени T зависит не только от тока I_p и относительной продолжительности включения ПВ, но

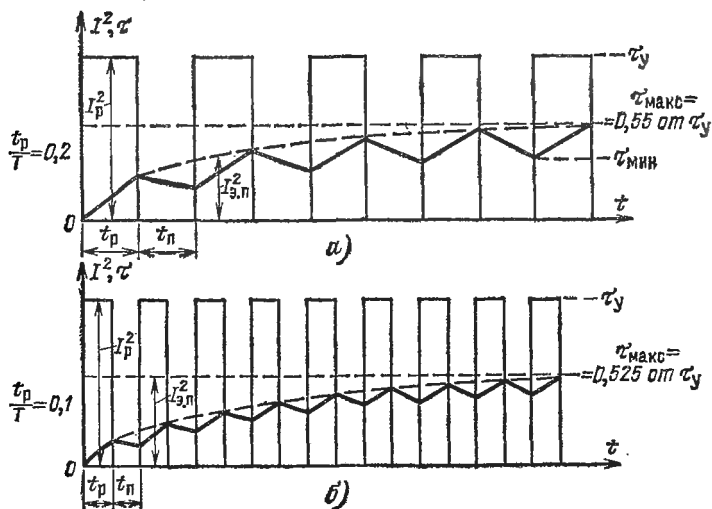


Рис. 5-5. Кривые превышения температуры резисторов при двух повторно-кратковременных режимах с равными I_p и ПВ=50%, но с различными t_p/T .

и от длительности рабочего периода t_p . Это хорошо иллюстрируется кривыми рис. 5-5, построенными для одного резистора при двух режимах с одинаковыми I_p и ПВ, но при различных t_p , так что в случае рис. 5-5, а имеем $t_p/T = 0,2$; в случае рис. 5-5, б имеем $t_p/T = 0,1$.

Из этих кривых видно, что большим рабочим периодам соответствуют большие колебания температуры и больший максимальный перегрев.

Рассматривая различные резисторы при данных I_p и ПВ, мы должны интересоваться отношением t_p/T , так как колебания температуры зависят от t_p и T .

С уменьшением t_p/T колебания температур уменьшаются и превышение температуры стремится к некоторому значению. Если в (5-10) взять предел для $\tau_{\max}$ при постоянной ПВ и при t_p/T , стремящемся к нулю, то получим:

$$\tau_{\max} = \tau_y \text{ПВ.} \quad (5-11)$$

Для рис. 5-5 при t_p/T , стремящемся к нулю, по (5-11) получим $\tau_{\max} = 0,5 \tau_y$.

Для выбора резистора по условиям нагрева определим эквивалентный ток, который вызовет то же максимальное превышение температуры, что и данный прерывистый. Считая в формуле (5-7) ток $I_{p2} = 0$, заменяя $t_{p1} + t_{p2}$ на $t_p + t_n = t_p/\text{ПВ}$ и опуская индексы 1, получаем:

$$I_{\text{э.п}} = I_p \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-t_p/T \cdot \text{ПВ}}}}. \quad (5-12)$$

Формула (5-12) справедлива для любых t_p/T и ПВ, а потому охватывает не только повторно-кратковременный режим, но и продолжительный (ПВ = 1) и кратковременный (ПВ = 0).

Для облегчения расчетов на рис. 5-6 построено семейство кривых $\frac{I_{\text{э.п}}}{I_p} = f\left(\frac{t_p}{T}\right)$ для различных ПВ%. Эти кривые рассчитаны по (5-12).

С увеличением t_p/T все кривые приближаются к кривой ПВ = 100%. Этого следовало ожидать, поскольку при продолжительности рабочего периода, равной $4T$, практически имеет место продолжительный режим.

Зная для предназначенного резистора его постоянную времени T и режим тока, т. е. I_p , t_p и ПВ, мы можем подсчитать t_p/T и по кривым рис. 5-6 определить отношение $I_{\text{э.п}}/I_p$; умножив его на известный ток I_p , определим эквивалентный длительный ток $I_{\text{э.п}}$. При любом данном ПВ и t_p/T , стремящемся к нулю, на основании (5-11) можем написать:

$$\frac{I_{\text{э.п}}^2}{A} = \frac{I_p^2}{A} \cdot \text{ПВ},$$

откуда

$$I_{\text{э.п}} = I_p \sqrt{\text{ПВ}}. \quad (5-13)$$

Как известно, по этой формуле определяется эквивалентный по теплоте ток, т. е. такой ток, при котором за время цикла выделяется такое же количество теплоты, как и при данном прерывистом.

Таким образом, по кривым рис. 5-6 значения $I_{\text{э.п}}/I_p$ при $t_p/T = 0$ соответствуют $I_{\text{э.т}}/I_p$.

При больших ПВ кривые рис. 5-6 пологи и потому при небольших t_p/T эквивалентные по нагреву токи будут мало отличаться от эквивалентных по теплоте.

Это дает возможность во многих практических случаях пользоваться (5-13) вместо точной, но более сложной (5-12).

Представим себе график нагрузки рис. 5-7, когда цикл включает в себя два неравных рабочих периода с неравными по величине нагрузками и две неравные паузы. Подобные графики встречаются в практике нередко.

Применяя общее уравнение теплового состояния резистора, для этого графика можно найти подобно (5-4) — (5-7) эквивалентный по нагреву продолжительный ток

$$I_{\text{э.п}} = \sqrt{\frac{I_{\text{р1}}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{р1}}}{T}}\right) + I_{\text{р2}}^2 \left(e^{-\frac{t_{\text{р1}} + t_{\text{п2}}}{T}} - e^{-\frac{t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{п2}}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{\text{п}}}{T}}}} \quad (5-14)$$

Формула (5-14) справедлива для графиков, в которых максимальное превышение температуры получается в рабочих периодах $t_{\text{р1}}$, как показано тонкой линией на рис. 5-7. Если график нагрузки таков, что максимальные превышения температуры получаются в рабочих периодах $t_{\text{р2}}$, то в (5-14) все индексы 1 и 2 нужно поменять местами,

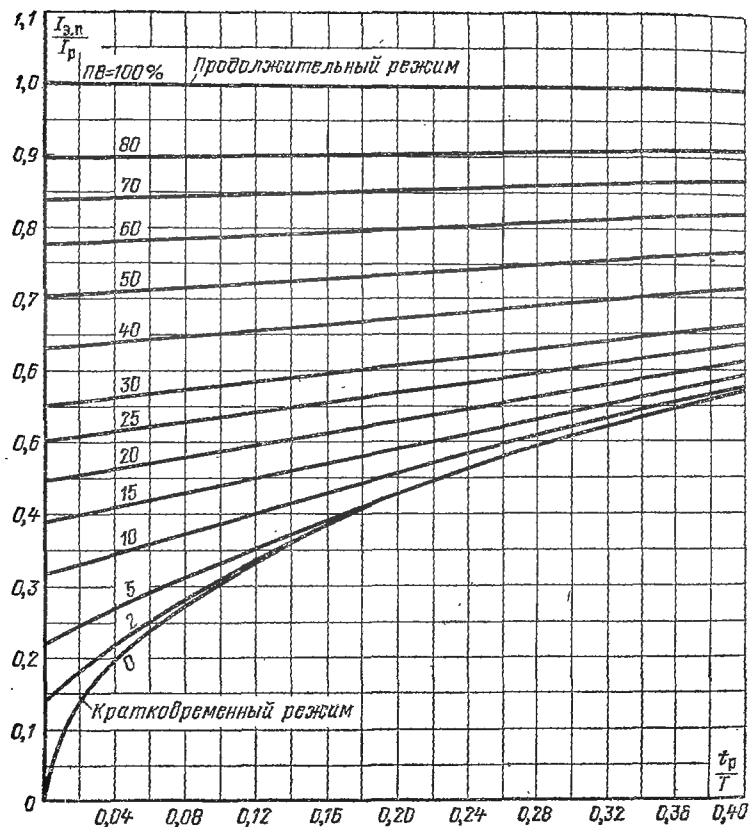


Рис. 5-6. Кривые $I_{\text{э.п.}}/I_{\text{р}} = f(t_{\text{р}}/T)$ для резисторов при различных ПВ %.

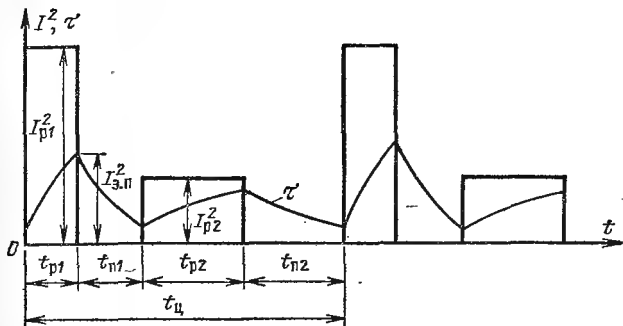


Рис. 5-7. График нагрузки с повторно-кратковременным режимом с двумя неравными рабочими периодами и двумя неравными паузами во время цикла.

т. е. эквивалентный по нагреву продолжительный ток при максимальном превышении температуры в периодах t_{p2} напишется:

$$I_{\Sigma.п} = \sqrt{\frac{I_{p2}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{p2}}{T}}\right) + I_{p1}^2 \left(e^{-\frac{t_{p2} + t_{n1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p2} + t_{p1} + t_{n1}}{T}}\right)}{1 - e^{-t_{\Sigma}/T}}} \quad (5-14')$$

Если по графику нагрузки нельзя сказать, в каких рабочих периодах будут получаться максимальные превышения температуры в t_{p1} или t_{p2} , то нужно определить $I_{\Sigma.п}$ по (5-14) и (5-14') в отдельности и принять полученное большее значение.

Работа резисторов в повторно-кратковременном режиме имеет в практике наиболее широкое распространение. С повторно-кратковременным режимом работает большинство кранов, вспомогательных механизмов прокатных станов и т. п.

Пример 5-1. Определить эквивалентный по превышению температуры длительный ток для резистора динамического торможения r_T по схеме рис. 2-68 и графику нагрузки на рис. 5-3 для двигателя постоянного тока 220 В, 40 кВт, $I_{\Sigma} = 200$ А, приводящего кривошипный толкатель методической печи. Двигатель пускается через равные промежутки времени с частотой $\nu = 240$ раз в час. Эквивалентный ток рабочего периода по расчету $I_p = 160$ А, время торможения, т. е. время рабочего периода, $t_p = 1,5$ с. Предполагаемый для установки резистор имеет постоянную времени нагрева $T = 300$ с и допускает продолжительный ток 30 А.

Решение. Время цикла

$$t_{\Sigma} = \frac{3600}{\nu} = \frac{3600}{240} = 15 \text{ с.}$$

Относительная продолжительность включения

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_{\Sigma}} 100 = \frac{1,5}{15} 100 = 10\%.$$

Отношение рабочего периода к постоянной времени:

$$\frac{t_p}{T} = \frac{1,5}{300} = 0,005.$$

По кривым рис. 5-6 находим для $t_p/T = 0,005$ и ПВ = 10% отношение

$$I_{э.п}/I_p = 0,32,$$

откуда искомый эквивалентный по нагреву ток равен:

$$I_{э.п} = 0,32 I_p = 0,32 \cdot 160 = 51 \text{ А.}$$

Имеющиеся в наличии резисторы по условию примера допускают длительно 30 А; поэтому, чтобы не перегреть их при эквивалентном токе 51 А, нужно включить резисторы в две параллельные ветви. Тогда резисторы будут допускать длительно $2 \cdot 30 = 60$ А либо нужно выбрать другие резисторы на больший ток.

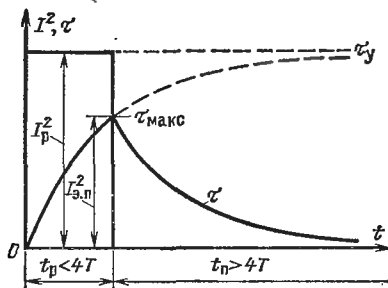


Рис. 5-8. Кривая превышения температуры резисторов при кратковременном режиме нагрузки.

Кратковременный режим. На рис. 5-8 показаны график тока и кривая превышения температуры при кратковременном режиме нагрузки. Практически кратковременный режим характеризуется тем, что рабочий период t_p (при неизменном токе) меньше $4T$, а пауза значительно больше $4T$.

Максимальное превышение температуры в конце рабочего периода определится:

$$\tau_{\text{макс}} = \tau_y (1 - e^{-t_p/T}). \quad (5-15)$$

Эта формула получается из уравнения теплового состояния (5-1) при $\tau_0 = 0$ или же из (5-10) для повторно-кратковременного режима при ПВ = 0.

Эквивалентный по нагреву продолжительный ток, который вызовет то же максимальное превышение температуры, что и данный кратковременный, найдется из (5-12), если принять ПВ = 0:

$$I_{э.п} = I_p \sqrt{1 - e^{-t_p/T}}. \quad (5-16)$$

Следует иметь в виду, что при наладках и опробованиях привода двигателя может пускаться несколько раз подряд. Исходя из этого, желательно рабочий период принимать равным 3-кратному рабочему периоду одного пуска.

Ток $I_{э.п}$ для кратковременного режима может быть найден также при помощи кривой рис. 5-6 при ПВ = 0.

В кратковременном режиме могут работать пусковые и тормозные резисторы редко пускаемых приводов. Режим двигателя при этом может быть или кратковременным, например для приводов подъема щитов плотин, раздвижения моста и т. п., или продолжительным, например для приводов клеток неререверсивных станков, правильных машин, транспортеров и т. п.

Пример 5-2. Определить эквивалентный по превышению температуры ток для ступеней пускового резистора двигателя параллельного возбуждения по условиям и данным примера 2-3, рис. 2-9. Предназначаемый резистор имеет постоянную времени $T = 250$ с и допускает продолжительный ток 33 А. Согласно примеру:

- а) привод пускается раз в смену;
- б) номинальный ток двигателя $I_H = 120$ А;
- в) пики момента $M_{1*} = 2$, моменты переключения $M_{2*} = 0,8$;
- г) время нахождения под током ступени r_1 равно: $t_1 = 1,35$ с и ступени r_2 равно: $t_2 = 1,35 + 0,54 \approx 1,90$ с.

Решение. С т у п е н ь r_1 . Эквивалентный по нагреву ток рабочего периода приближенно (с запасом) определится (табл. 5-1):

$$\begin{aligned} \text{где} \quad I_{p1} &= \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}}, \\ I_1 &= 2I_H = 2 \cdot 120 = 240 \text{ А}; \\ I_2 &= 0,8I_H = 0,8 \cdot 120 = 96 \text{ А}; \\ I_{p1} &= \sqrt{\frac{240^2 + 96^2 + 240 \cdot 96}{3}} = 173 \text{ А}. \end{aligned}$$

Считаем рабочий период 3-кратным:

$$t_{p1} = 3t_1 = 3 \cdot 1,35 = 4,05 \text{ с}.$$

По кривой ПВ = 0 рис. 5-6 находим для $\frac{t_{p1}}{T} = \frac{4,05}{250} = 0,016$ отно-

шение $\frac{I_{\text{э.п}}}{I_{p1}} = 0,13$, откуда $I_{\text{э.п}} = 0,13 \cdot I_{p1} = 0,13 \cdot 173 = 23 \text{ А}$.

С т у п е н ь r_2 . Имеем $I_{p2} = 173 \text{ А}$, т. е. такой же, как I_{p1} ;

$$t_{p2} = 3t_2 = 3 \cdot 1,9 = 5,7 \text{ с}.$$

Для этой ступени применим формулу (5-16):

$$I_{\text{э.п}} = I_{p2} \sqrt{1 - e^{-t_{p2}/T}} = 1,73 \sqrt{1 - e^{-5,7/250}} = 24 \text{ А}.$$

Полученные эквивалентные токи для ступеней r_1 и r_2 лишь немного отличаются от допустимого, равного 33 А, поэтому резистор является удовлетворительным по нагреву.

Пример 5-3. Определить эквивалентный по нагреву длительный ток для кратковременного тока $I_p = 150 \text{ А}$, протекающего через ящик резисторов с чугунными элементами № 105 в течение $t_p = 16$ с.

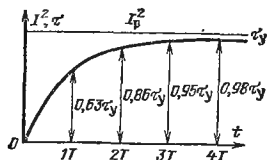
Решение. По табл. 5-7 находим для ящика №105 постоянную времени $T = 400$ с. Определяем $\frac{t_p}{T} = \frac{16}{400} = 0,04$. По кривой ПВ = 0 (так как режим кратковременный) рис. 5-6 находим $I_{\text{э.п}}/I_p = 0,2$.

Поэтому искомый эквивалентный по нагреву длительный ток равен:

$$I_{\text{э.п}} = 0,2I_p = 0,2 \cdot 150 = 30 \text{ А},$$

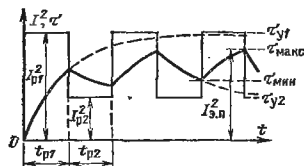
что приемлемо, так как ящик резисторов № 105 допускает длительно 33 А.

Расчет эквивалентных продолжительных токов по превышению температуры над температурой окружающей среды



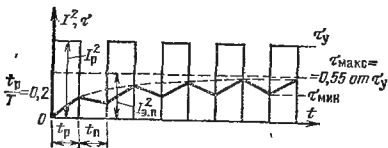
а) Продолжительный режим

$$I_{\text{э.п}} = I_p$$



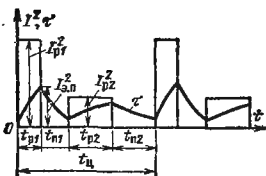
б) Перемежающий режим

$$I_{\text{э.п}} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}\right) + I_{p2}^2 \left(e^{-\frac{t_{p1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}}}$$



в) Повторно-кратковременный режим

$$I_{\text{э.п}} = I_p \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_{\text{ПВ}}}}}}$$

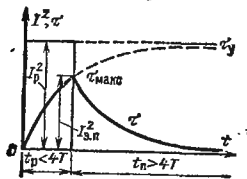


г) Повторно-кратковременный режим с двумя неравными рабочими периодами: если максимальное превышение температуры получается в рабочих периодах t_{p1} ,

$$I_{э.п} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}}\right) + I_{p2}^2 \left(e^{-\frac{t_{p1} + t_{n2}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2} + t_{n2}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{ц}}{T}}}},$$

если максимальное превышение температуры в рабочих периодах t_{p2} ,

$$I_{э.п} = \sqrt{\frac{I_{p2}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{p2}}{T}}\right) + I_{p1}^2 \left(e^{-\frac{t_{p2} + t_{n1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p2} + t_{p1} + t_{n1}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{ц}}{T}}}},$$



д) Кратковременный режим

$$I_{э.п} = I_p \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}$$

Продолжительный режим. При неизменном токе для того, чтобы превышение температуры достигло практически установившегося значения, рабочий период должен быть больше $4T$.

На рис. 5-9 даны график и кривая нагрева для продолжительного режима, соответствующего граничному случаю, когда $t_p = 4T$.

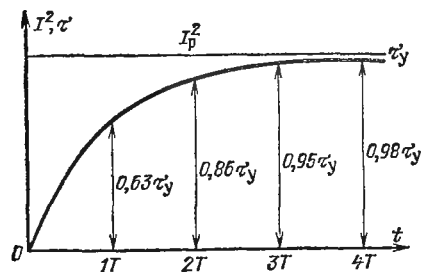


Рис. 5-9. Кривая превышения температуры резистора при продолжительном режиме с постоянной нагрузкой.

Этот режим имеет место обычно для постоянно включенных секций резисторов в цепях продолжительно работающих двигателей с постоянной нагрузкой.

Расчетные выражения эквивалентных токов для всех рассмотренных режимов сведены в табл. 5-2.

3. РАСЧЕТНЫЕ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТОКОВ В РЕЗИСТОРАХ

Приведенные выше способы для нахождения эквивалентных продолжительных токов дают достаточно точные результаты по превышению температуры. Их нужно применять для крупных двигателей, например для главных приводов прокатных станов, а также для специальных и нестандартных приводов. Но эти способы вызывают затруднения при массовых расчетах, так как они требуют кропотливых расчетов диаграмм токов во времени и знания постоянной времени нагрева T , которая становится известной лишь после выбора конкретного резистора.

Составление графиков нагрузок резисторов для ряда приводов со сложным режимом работы представляет большую трудность. В этих случаях при расчете резисторов на нагрев обычно пользуются опытными данными.

Для приводов, управляемых при помощи широко распространенных контакторных панелей или силовых контроллеров, проектные организации и заводы нормализуют режимы работы резисторов и предлагают пользоваться в расчетах определенными расчетными и проверенными на практике сопротивлениями ступеней резисторов и эквивалентными по превышению температуры продолжительными токами.

В табл. 5-3 — 5-5 приведены такие данные для двигателей постоянного и переменного тока для разных схем.

Таблицы составлены исходя из применения чугунных или фехралевых резисторов, обладающих большими постоянными времени нагре-

**Сопrotивления и эквивалентные токи резисторов для
двигателей последовательного и смешанного возбуждения,
управляемых контакторными панелями**

Степень	Относительное сопротивление	Относительный эквивалентный продолжительный ток
---------	-----------------------------	---

2 степени ускорения + 1 степень противовключения
(рис. 2-22)

r_2	0,2	0,6
r_1	0,3	0,5
$r_{пр}$	0,8	0,35

2 степени ускорения + 1 степень динамического торможения
(рис. 2-49)

r_2	0,2	0,6
r_1	0,3	0,5
r_T	0,45	0,35
$r_{п}$	0,45	0,35

Таблица 5-4

**Сопrotивления и эквивалентные длительные токи резисторов
для асинхронных двигателей с фазным ротором,
управляемых контакторными панелями**

Степень	Относительное сопротивление	Относительный эквивалентный продолжительный ток
---------	-----------------------------	---

2 степени ускорения + 1 степень противовключения
(рис. 3-22, но две степени вместо трех)

r_2	0,07	0,6
r_1	0,22	0,5
$r_{пр}$	0,67	0,35

Постоянно включенная секция + 3 степени ускорения + 1 степень
противовключения (крановая панель типа Т, рис. 3-22)

$r_{пост.вкл}$	0,05	1
r_3	0,1	0,6
r_2	0,2	0,47
r_1	0,34	0,29
$r_{пр}$	1,26	0,22

ва. В случае применения проволочных резисторов, имеющих малые постоянные времени, эквивалентные токи должны быть несколько увеличены.

В табл. 5-3 и 5-4 приведены средние данные, рекомендуемые для двигателей постоянного тока и асинхронных, приводящих вспомога-

**Асинхронный двигатель с фазным ротором.
Управление барабанным силовым контроллером
типа КТ-3005 (рис. 3-18)**

Степень	Относительное сопротивление	Относительный эквивалентный продолжительный ток
1—2	0,625	0,46
2—3	0,185	0,46
1—4	1,40	0,46
4—5	0,42	0,46
5—6	0,10	0,46
1—7	0,93	0,46
7—8	0,28	0,46
8—9	0,04	0,46

тельные механизмы прокатных станов. Эти данные базируются на пиках момента 2 — 3-кратных и моментах переключения, 1-кратных номинальному.

В табл. 5-5 приведены данные завода «Динамо» для асинхронных двигателей, применяемых для приводов передвижения моста и тележки кранов.

Приведенные таблицы могут служить также для ориентировки при расчете сопротивлений резисторов для аналогичных случаев.

Данные резисторов для привода подъема кранов на постоянном токе приведены в табл. 2-11.

Пример 5-4. Рассчитать сопротивления и эквивалентные продолжительные токи пусковых ступеней резистора и ступени противовключения для асинхронного двигателя типа МТ-52-8, 380 В, 30 кВт, 725 об/мин, ПВ = 25%, $E_{p.n} = 257$ В, $E_{p.n} = 74,3$ А, управляемого по схеме рис. 3-22, но с двумя ступенями ускорения.

Решение. Номинальное сопротивление

$$R_{p.n} = \frac{E_{p.n}}{\sqrt{3} I_{p.n}} = \frac{257}{\sqrt{3} \cdot 74,3} = 2 \text{ Ом.}$$

По табл. 5-4, считая сопротивления отнесенными к $R_{p.n} = 2$ Ом и токи к $I_{p.n} = 74,3$, получаем:

Степень	Сопротивление, Ом	Эквивалентный продолжительный ток, А
r_2	$0,07 \cdot 2 = 0,14$	$0,6 \cdot 74,3 = 44,6$
r_1	$0,22 \cdot 2 = 0,44$	$0,5 \cdot 74,3 = 37,1$
$r_{пр}$	$0,67 \cdot 2 = 1,34$	$0,35 \cdot 74,3 = 26,0$

1. МАТЕРИАЛЫ РЕЗИСТОРОВ

Материалы, идущие на изготовление резисторов, должны удовлетворять определенным требованиям, важнейшие из которых заключаются в следующем: высокое удельное сопротивление, минимальное изменение сопротивления от температуры, высокая температура плавления, прочность, слабая подверженность коррозии, легкая обрабатываемость, дешевизна.

Перечисленные требования являются общими для всякого резистора, но в зависимости от применения значимость отдельных требований различна; так, наиболее существенны для средств передвижения — прочность, для двигателей средних и крупных — дешевизна материала резистора, для приводов с точной регулировкой частоты вращения — минимальная изменчивость сопротивления от температуры и т. д.

Как известно, сопротивление проводника однородного сечения может быть выражено формулой

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (5-17)$$

где l — длина; s — сечение; ρ — удельное сопротивление проводника.

В технике принято считать l в метрах, s в квадратных миллиметрах. Поэтому удельное сопротивление имеет единицу $1 \text{ мОм} \cdot \text{м} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и представляет собой сопротивление проводника в омах, сечение которого 1 мм^2 и длина 1 м .

Удельное сопротивление зависит от температуры.

В практических приближенных расчетах можно для температур $0 - 100^\circ\text{C}$ и даже до 200°C принимать:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \vartheta), \quad (5-18)$$

где ρ_0 и ρ — удельные сопротивления при температурах соответственно 0 и ϑ , $^\circ\text{C}$; α — средний температурный коэффициент для рассматриваемого диапазона температур.

Для некоторого проводника, имеющего сопротивление R_0 при 0°C , определим сопротивление R при температуре ϑ , $^\circ\text{C}$:

$$R = R_0 (1 + \alpha \vartheta). \quad (5-19)$$

Здесь очевидно, что температурный коэффициент α представляет собой относительное изменение сопротивления при изменении температуры проводника на 1°C .

На основании (5-19) легко показать, что по данному сопротивлению R_1 при температуре ϑ_1 найдется сопротивление R_2 при температуре ϑ_2 из выражения

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha \vartheta_2}{1 + \alpha \vartheta_1}. \quad (5-20)$$

Для изготовления резисторов к двигателям из чистых металлов применяют лишь никель и железо, для большинства же случаев употребляют сплавы высокого сопротивления. Основными металлами, идущими на изготовление сплавов, являются медь, никель, сталь, марганец, хром.

Материалы резисторов
(даны в порядке возрастания температурных коэффициентов)

Название	Состав, %	Удельное сопротивление, мкОм · м	Температурный коэффициент, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Максимально допустимая температура, $^{\circ}\text{C}$
Константан	Cu 60; Ni 40	0,480	-0,0000300	500
Фехраль	Fe 80; Cr 15; Al 5	1,18	0,00008	850
Нихром А	Ni 87; Cr 11; Mn 2	0,87	0,00017	930
Нихром В	Ni 61; Cr 15; Fe 20; Mn 4	1,13	0,00017	1000
Никелин	Cu 62; Ni 18; Zn 20	0,420	0,0003000	200
Реотан	Cu 53,4; Ni 25,3; Zn 16,8; Fe 4,5	0,470	0,0004100	200
Чугун	Fe 92,8; C 3,6; Si 1,72; Mn 0,75; P 1,06	0,8	0,0010000	400
Железо	Fe 99,9; S 0,085	0,130	0,0024000	—
Никель	Ni 100	0,102	0,0050000	—

Примечание. Количества отдельных составляющих в сплаве могут меняться, при этом будут меняться свойства сплава. В некоторых случаях достаточно незначительного изменения количества примесей, чтобы значительно изменить свойства сплава.

Из приводимых в табл. 5-6 данных материалов резисторов следует, что константан имеет очень небольшой температурный коэффициент. Отметим также, что чугун, железо, никель имеют очень большой температурный коэффициент. Нихром и фехраль имеют высокую допустимую температуру.

2. ЯЩИКИ РЕЗИСТОРОВ С ЧУГУННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ящики резисторов с чугунными элементами применяются для двигателей постоянного и переменного тока всех мощностей, начиная от 3 до нескольких тысяч киловатт. В больших количествах ящики резисторов с чугунными элементами применяются для приводов кранов и для приводов в металлургической промышленности.

Конструкция и габариты. Чугунные элементы, из которых набираются ящики, представляют собой литые зигзагообразные пластины, имеющие на концах ушки с отверстиями для крепления.

Элементы бывают двух типов: большие и малые. Ушки у больших элементов в 2 раза толще, чем у малых, поэтому два сложенных вместе малых элемента занимают столько же места, сколько один большой элемент. На рис. 5-10 показаны большой элемент (вверху) и малый (внизу), а также зажимы к ним.

Для обеспечения хорошего контакта, а также для предохранения от коррозии элементы покрываются цинком.

Элементы собираются на двух шпильках (стержнях), изолированных микафолием. В соответствующих местах между ушками прокла-

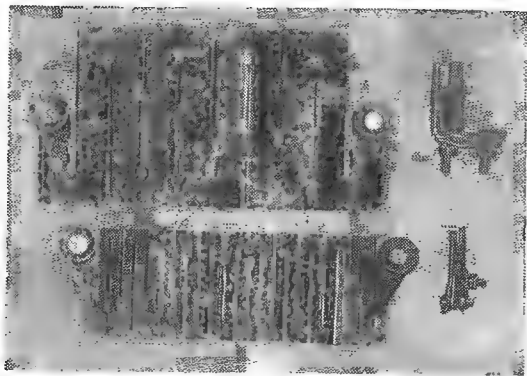


Рис. 5-10. Чугунные литые элементы большие и малые и зажимы к ним.

дываются слюдяные шайбы, чем осуществляется последовательное соединение элементов в ящике. Между определенными ушками вставляются зажимы для внешних соединений.

Собранные на шпильках элементы затягиваются гайками. Для того чтобы контакт между элементами не нарушался от расширения при нагреве, от механических толчков и от усыхания слюдяных шайб, создается постоянное нажатие на элементы компенсационными пружинами, которые надеты на шпильки между пакетом элементов и затягивающими гайками.

Посредством изоляционных фарфоровых втулок пакет элементов крепится к двум штампованным из листовой стали боковинам.

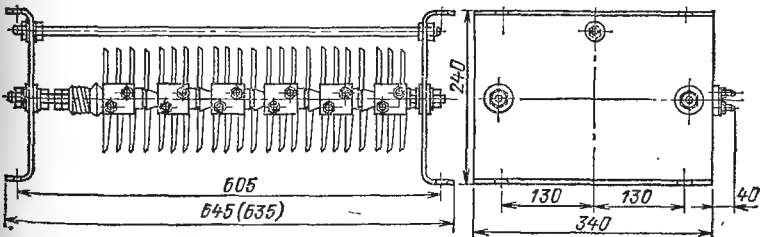


Рис. 5-11. Размеры ящика резисторов стандартного ЯС100 или ЯС101 и кранового типа Н (размер 645 — стандартного ящика, 635 — ящика типа Н; все остальные размеры одинаковы).

Технические данные ящиков резисторов с чугуниными элементами

№ ящика	Продол- жительный ток (превы- шение тем- пературы 270°C), А	Сопроти- вление ящичка (холод- ное), Ом	Сопроти- вление элемента (холод- ное), Ом	Постоян- ная вре- мени нагрева T, с	Число элементов	Стандартные ящики		Крайовые ящики		Масса ящичка, кг
						Тип ящичка	Форма элемента	Тип ящичка	Каталож- ный № элемента	
5	215	0,10	0,005	850	20	ЯС-100	НС-400	Н	9015	38,5
7	181	0,14	0,007	820	20				9016	31,6
10	152	0,20	0,010	635	20				9017	35,2
14	128	0,28	0,014	555	20				9001	28,6
20	107	0,40	0,020	575	20				9018	29,5
28	91	0,56	0,028	432	20				9002	24,2
40	76	0,80	0,040	547	20				9003	28,5
55	64	1,10	0,055	408	20				9004	23,5
80	54	1,60	0,080	550	20				9005	28,6
110	46	2,20	0,110	423	20				9019	24
38	55	1,52	0,038	~ 600	40	ЯС-101	НС-401	Н	—	32,1
54	46	2,16	0,054	~ 600	40				—	25,7
75	39	3	0,075	532	40				9553	27,9
105	33	4,2	0,105	400	40				9554	23,5
140	29	5,6	0,140	530	40				9555	27,3
200	24	8	0,200	386	40				—	23,1
280	20	11,2	0,280	435	40				—	24,7

Таким образом, достигается двойная изоляция элементов относительно земли.

Размеры боковин и расстояния между ними, а также диаметры и разметка отверстий для крепления одинаковы у всех ящиков.

На рис. 5-11 дан чертеж ящика резисторов с чугунными элементами.

Конструкция зажимов такова, что позволяет присоединение без пайки внешних проводов одножильных и многожильных, а также плоских шин различных сечений.

Ящики резисторов приведенной конструкции с указанными количествами чугунных элементов, а также с определенной расстановкой зажимов называются стандартными и имеют типы ЯС100 с большими элементами и ЯС101 — с малыми.

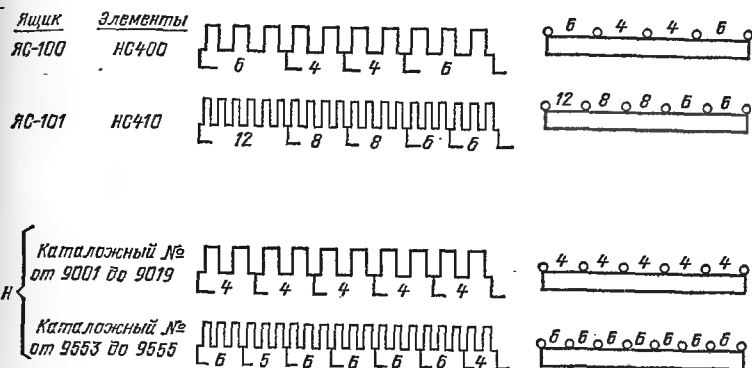


Рис. 5-12. Схемы расстановки зажимов в ящиках резисторов стандартных типов ЯС100 и ЯС101 и крановых типа Н с чугунными элементами.

Очень близки к стандартным ящикам ЯС100, ЯС101 ящики резисторов крановые типа Н, которые являются взаимозаменяемыми.

Электрические данные. Чугун, применяемый для резисторов, имеет удельное сопротивление $\rho = 0,8$ мкОм·м и большой температурный коэффициент $\alpha \approx 0,001^\circ\text{C}^{-1}$, превышение температуры резисторов принимается 270°C исходя из температуры окружающей среды 35°C . Допускается температура до 400°C .

Чугунные элементы резисторов стандартизованы: всего имеется 17 номеров элементов, из которых 10 больших и 7 малых.

Как видно из табл. 5-7, все ящики резисторов различаются по номерам (первый столбец) соответственно сопротивлениям элементов, а именно: номер ящика соответствует сопротивлению элемента $\times 1000$. Благодаря слюдяным прокладкам между ушками все элементы оказываются последовательно соединенными.

По данным табл. 5-7 легко установить, что ящик резисторов любого номера может длительно расходовать и выделять мощность около 4,5 кВт.

На рис. 5-12 даны схемы расстановки зажимов в ящиках резисторов, где цифры обозначают число элементов, заключенных между сосед-

ними зажимами. Схемы слева показывают наглядно соединение между элементами (вертикальные полосы) и места установки зажимов. Схемы справа представляют собой более простое условное обозначение резисторов, принятое для изображения резисторов в схемах управления двигателями.

Крановые ящики резисторов типа Н имеют большее число зажимов, чем стандартные, так как крановые контакторные панели и силовые контроллеры рассчитаны на большее число ступеней.

Различие в числе и размещении зажимов в крановых ящиках резисторов типа Н практически не ухудшает взаимозаменяемость со стандартными ящиками резисторов благодаря возможности переставлять зажимы. Зажимы, как показано на рис. 5-10 справа, имеют

овальные прорези и потому легко вынимаются и вставляются без разбора ящика путем ослабления компенсационной пружины при помощи гаек на шпильках.

Ввиду того что стандартные ящики имеют одинаковые размеры, можно, имея на складе запасные ящики, быстро заменить вышедший из строя (от сгорания или разрыва элементов). Возможность быстрой замены

является большим их преимуществом в тех случаях, когда необходима бесперебойность работы электрооборудования.

Стандартные ящики резисторов широко применяются для приводов металлургических заводов, для напряженно работающих кранов и для других приводов, простой которых связан с большими потерями.

Для крупных двигателей, для которых по условиям нагрева устанавливается большое число ящиков с параллельными соединениями, применяются исключительно стандартные ящики, поскольку комбинирование разных элементов в ящиках не дает эффекта.

Для возможности использования одного ящика резисторов в трех фазах асинхронных трехфазных двигателей имеются еще двух- и трехсекционные ящики, разделенные театитовыми шайбами соответственно на две или три секции. Эти ящики изготавливаются не на 20 и 40 элементов, а на 18 и 36 с теми же номерами элементов и размерами, как стандартные. Схемы этих ящиков показаны на рис. 5-13.

Токи ящиков резисторов, даже кратковременные, не должны превышать 800 А. Большие токи не допускаются для зажимов, а также по динамическим усилиям для элементов.

Монтаж. Ящики устанавливаются на горизонтальной плоскости чаще всего на полу, причем по условиям охлаждения элементы должны быть обязательно расположены в вертикальной плоскости.

Группы ящиков комплектуются путем установки непосредственно один на другом и сблчиванием между собой (рис. 5-14) или в стойках.

По условиям нагрева не рекомендуется ставить непосредственно друг на друга более чем 3 ящика, так как верхние ящики сильно перегреваются и, кроме того, затрудняется замена нижнего и средних ящиков в случае аварий.

В стойках устанавливается один над другим до шести ящиков. По условиям нагрева расстояние между полками стойки должно быть не менее 320 мм (на 80 мм больше высоты ящика), а между полом и основанием нижнего ящика — не менее 150 мм.

При комплектовании ящиков в стойках съем одного из них значительно проще и может быть произведен быстрее, чем при комплектовании сболчиванием между собой. Поэтому для таких ответственных установок, как привод металлургических заводов, ящики устанавливаются исключительно в стойках независимо от их числа.



Рис. 5-14. Три стандартных ящика резисторов, установленных непосредственно один на другом и сболченных между собой.

Соединения между отдельными ящиками и в пределах одного ящика производятся голым проводом или шинами. Подходящие к ящикам внешние провода желательно выполнять проводом с огнеупорной или медленно тлеющей изоляцией.

Ограничимся здесь рассмотрением некоторых стандартных и крановых ящиков резисторов с чугунными элементами. Имеются еще ящики ЯС нестандартные с разными количествами больших элементов — от 14 до 30 и малых от 28 до 60, а также ящики резисторов типа СН1 — СН8 со штампованными железными элементами тех же номеров, что и чугунные. Имеются высоковольтные ящики резисторов на изоляторах серий ЯС190 и СВ, ящики защищенные, в масле, ящики подвесного исполнения.

3. ЯЩИКИ РЕЗИСТОРОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА, АЛЮМИНИЯ И ХРОМА (ФЕХРАЛЕЙ)

Ящики резисторов с фехралевыми элементами применяются для тех же мощностей двигателей, что и с чугунными элементами, т. е. от 3 до нескольких тысяч киловатт.

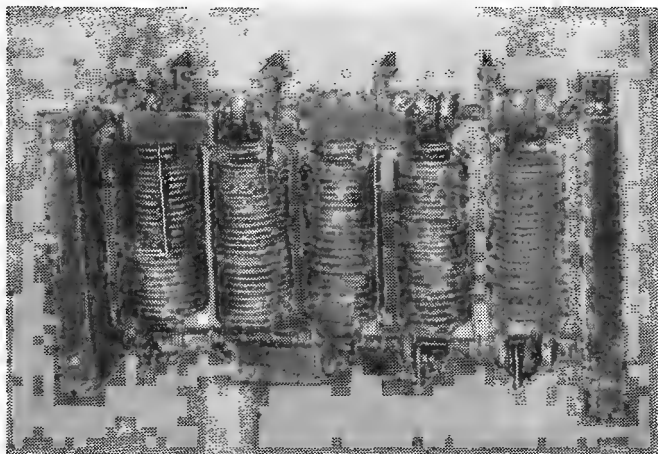


Рис. 5-15. Ящик резисторов типа КФ с фехралевыми элементами (поставлен боком).

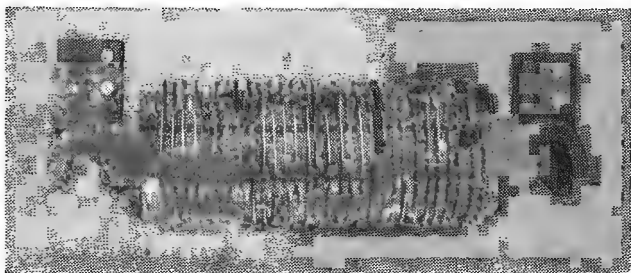


Рис. 5-16. Фехралевый элемент.

По сравнению с чугунными фехралевые элементы обладают следующими преимуществами: не бьются и не так боятся перегрева, так как при расчетной температуре, одинаковой с чугунными (270°C), допускают температуру до 850°C ; кроме того, фехраль имеет очень небольшой температурный коэффициент. Поэтому, несмотря на более высокую стоимость, они в настоящее время заменяют ящики с чугунными элементами.

Технические данные ящиков резисторов типа КФ с фехралевыми элементами

Каталожный № ящика	Схемы соединения по рис. 5-18	Соответствующий № ящика с чугунными элементами	Продолжительный ток (превышение температуры 270°C), А	Сопротивление ящика (холодное), Ом	Количество ступеней $\times$ сопротивление ступени, Ом	Сопротивление элемента, Ом	№ элемента	Постоянная времени нагрева T , с	Масса ящика, кг
50171	<i>в</i>	(5)	215	0,1	$5 \times 0,0192$	0,077	21	450	30
50172	<i>в</i>	(7)	181	0,13	$5 \times 0,0255$	0,102	22	350	30
50173	<i>в</i>	(10)	152	0,2	$5 \times 0,04$	0,155	23	300	30
50174	<i>в</i>	(14)	128	0,29	$5 \times 0,0575$	0,23	24 *	250	30
50161	<i>а</i>	(20)	107	0,385	$5 \times 0,077$	0,077	21	450	30
50162	<i>а</i>	(28)	91	0,51	$5 \times 0,102$	0,102	22	350	30
50163	<i>а</i>	(40)	76	0,8	$5 \times 0,16$	0,16	23	300	30
50164	<i>а</i>	(55)	64	1,15	$5 \times 0,23$	0,23	24	250	30
50165	<i>а</i>	(80)	54	1,6	$5 \times 0,32$	0,32	25	300	30
50166	<i>а</i>	(110)	46	2,1	$5 \times 0,42$	0,42	26	250	30
50167	<i>б</i>	(75)	39	3	$6 \times 0,45 + 1 \times 0,3$	0,6	27	300	30
50168	<i>б</i>	(105)	33	4,2	$6 \times 0,63 + 1 \times 0,42$	0,84	28	250	30

Удельное сопротивление 1,18 мкОм $\cdot$ м, температурный коэффициент 0,00008°C⁻¹.

Технические данные ящиков резисторов типа ЯС4 с фехралевыми элементами

Обозначение ящика	Ток продол- житель- ного режима, А	Общее сопроти- вление ящика, Ом	Сопротивление ступеней, Ом							Число вывод- ных за- жимов	Постоян- ная вре- мени на- грева T , с	Масса ящика, кг
			$P1-P2$	$P2-P3$	$P3-P4$	$P4-P5$	$P5-P6$	$P6-P7$	$P7-P8$			
ЯС4-0,098	215	0,098	0,0204	0,0186	0,0186	0,0204	0,0195	—	—	6	200	21
ЯС4-0,125	181	0,125	0,024	0,026	0,026	0,024	0,025	—	—	6	270	22
ЯС4-0,189	152	0,189	0,0364	0,0391	0,0391	0,0364	0,0377	—	—	6	150	20
ЯС4-0,294	124	0,294	0,0575	0,060	0,060	0,0575	0,0587	—	—	6	220	21
ЯС4-0,39	107	0,39	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	—	—	6	200	21
ЯС4-0,5	91	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	—	—	6	270	22
ЯС4-0,755	76	0,755	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	—	—	6	150	20
ЯС4-1,175	62	1,175	0,235	0,235	0,235	0,235	0,235	—	—	6	220	21
ЯС4-1,56	54	1,56	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	—	—	6	210	21
ЯС4-2,05	46	2,05	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	—	—	6	230	21
ЯС4-3	38,5	3	0,445	0,46	0,44	0,455	0,455	0,44	0,305	8	150	20
ЯС4-4,075	33	4,075	0,604	0,626	0,596	0,619	0,619	0,596	0,415	8	110	19
ЯС4-5,4	28,5	5,4	0,773	0,859	0,81	0,798	0,798	0,81	0,552	8	50	17
ЯС4-6,85	24	6,85	1,02	1,05	1,0	1,04	1,04	1,0	0,7	8	70	18

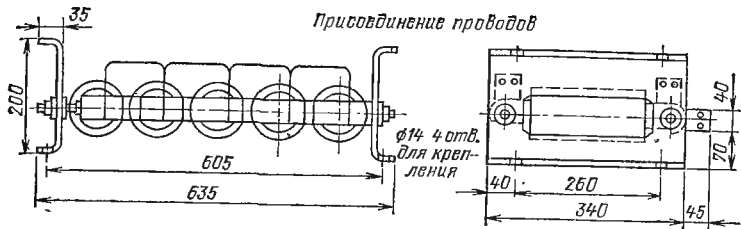


Рис. 5-17. Размеры ящика резисторов типа КФ с фехралевыми элементами.

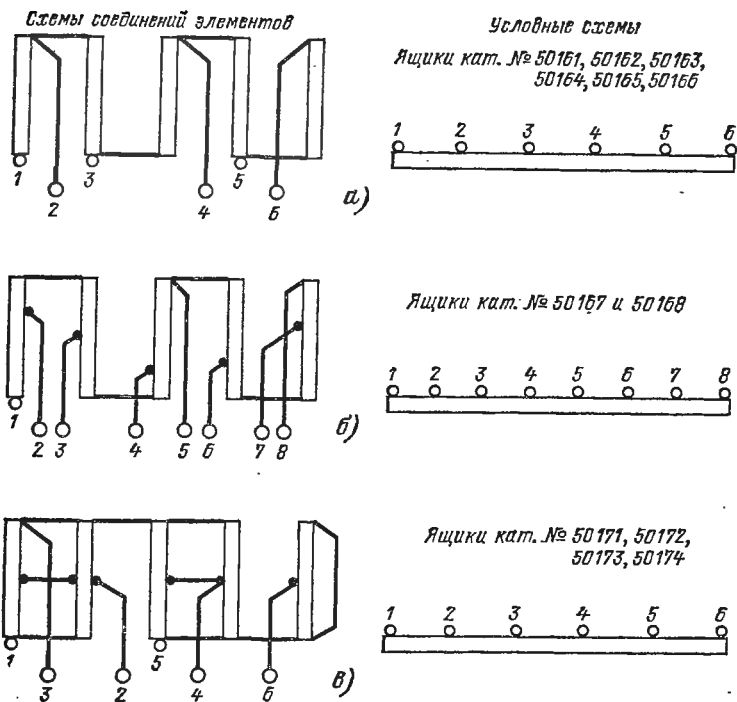


Рис. 5-18. Схемы соединений элементов и выводов для ящиков резисторов типа КФ с фехралевыми элементами.

Фехралевые резисторы применяются для подъемно-транспортных устройств, на электрическом транспорте, а также для приводов в разных отраслях промышленности.

Конструкция и габариты. Ящик резисторов типа КФ показан на рис. 5-15; он набирается из пяти фехралевых элементов.

Фехралевый элемент (рис. 5-16) состоит из стального остова, на котором установлены фарфоровые или стеатитовые сегментные держатели с желобками для наматываемой на ребро фехралевой ленты. К концам фехралевой ленты приварены медные пластины с вырезами, служащие для соединения элементов между собой при помощи шин. Между элементами устанавливаются фарфоровые изоляторы и втулки. Выводы из ящиков осуществляются при помощи зажимов.

Общие размеры ящика КФ (рис. 5-17) такие же, как типа Н с чугунными элементами, за исключением высоты (200 вместо 240 мм) и размера зажимов, выступающих из габарита ящика (45 вместо 40 мм). Ящики типа КФ могут устанавливаться в одних стойках с ящиками типов Н, ЯС100, ЯС101 и даже устанавливаться непосредственно один на другом и сболчиваться вместе. Ящики типа ЯС4 имеют размеры ящиков с чугунными элементами.

Электрические данные. Технические данные ящиков типа КФ с фехралевыми элементами даны в табл. 5-8, а схемы соединений и выводов — на рис. 5-18. Данные ящиков типа ЯС4 приведены в табл. 5-9.

Нетрудно видеть из табл. 5-8, что ящики типа КФ имеют то же число выводов и те же сопротивления и допускаемые токи, что и ящики с чугунными элементами типа Н. Рассеиваемая мощность также равна 4,5 кВт для любого ящика КФ.

В ящиках типа КФ всего имеется 8 номеров элементов: с 21-го по 28-й. Для небольших токов, до 107 А, элементы соединяются последовательно (рис. 5-18, а и б), а для токов начиная с 128 А и выше соединяются параллельно (рис. 5-18, в).

В ящиках с фехралевыми элементами можно пользоваться лишь имеющимися выводами и нельзя их переставлять, как в ящиках с чугунными элементами, потому что отводы от элементов выполнены гайкой.

4. ЯЩИКИ РЕЗИСТОРОВ С ПРОВОЛОЧНЫМИ И ЛЕНТОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ящики с проволочными и ленточными элементами применяются для двигателей малых мощностей (1—10 кВт) в цепях якоря, статора и ротора и для более мощных двигателей в цепях возбуждения.

Конструкция и габариты. Ящики резисторов представляют собой набор из константановых проволочных или ленточных элементов в железном каркасе.

Проволочный элемент, как показано на рис. 5-19 сверху, состоит из железной пластины-держателя с вырезами для крепления его в ящике, с насаженными на боковых ребрах на гипсе двумя рядами стеатитовых изоляторов цилиндрической формы. Изоляторы имеют бороздки, по которым наматывается проволока. Концы проволоки закрепляются простой скруткой, образующей петли, которые одновременно являются выводами.

Присоединение соединительных проводов осуществляется при помощи винта с гайкой и шайбой. Можно иметь добавочные выводы из середины элемента, для чего применяется специальный фасонный зажим из той же константановой проволоки, изогнутой в форме петли с двумя

ушками. Этот фасонный зажим накладывается на элемент в любом месте и, будучи стянут винтом с гайкой, дает надежный контакт между зажимом и проволокой элемента. При этом один виток перемыкается зажимом накоротко и соответственно уменьшается величина общего сопротивления элемента. Соединительный провод подводится под гайку винта и затягивается.

Ленточные элементы (рис. 5-19, внизу) имеют такую же конструкцию, как и проволочные, с той лишь разницей, что вместо константовой проволоки на стеатитовые изоляторы наматывается константовая лента, а выводы осуществляются посредством специальных прижимных пластин.

Элементы в количестве 10 шт. вставляются в стандартный ящик типа ЯС100/2, такой же по размерам, как и ящики типов ЯС100 и ЯС101 (рис. 5-11). Аналогичные по конструкции элементы ЭСЗ в количестве 11 шт. вставляются в стандартный ящик ЯСЗ.

Поэтому ящики ЯС-100/2 и ЯСЗ с проволочными и ленточными элементами могут устанавливаться вместе с ящиками типов ЯС100, ЯС101 и Н с чугунными элементами, а также с ящиками типов ЯС4 и КФ с фехрелевыми элементами.

Мы ограничимся рассмотрением лишь стандартных открытых ящиков резисторов, хотя имеется множество типов ящиков, в которые может быть встроено до 48 проволочных и ленточных элементов. Имеются ящики защищенные, в масле, ящики подвешного исполнения с количеством элементов от 2 до 24.

Электрические данные. Технические данные стандартных ящиков резисторов типа ЯС100/2 с проволочными и ленточными элементами приведены в табл. 5-10, а на рис. 5-20 дана схема соединений элементов. Технические данные стандартных ящиков приведены в табл. 5-11.

Проволочные и ленточные элементы изготавливаются из константана с ничтожно малым температурным коэффициентом — около

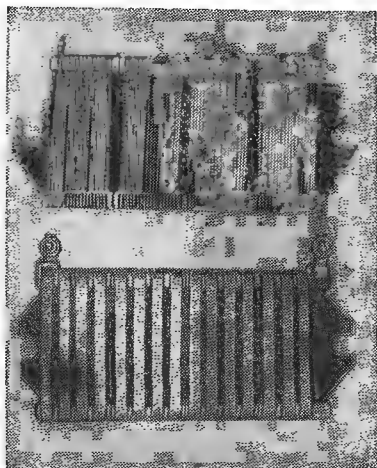
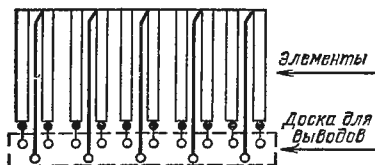


Рис. 5-19. Проволочный и ленточный элементы.

Рис. 5-20. Схема соединений элементов и выводов для ящиков резисторов типа ЯС100/2 с проволочными и ленточными элементами.



Технические данные ящиков резисторов типа ЯС100/2 с ленточными и проволочными элементами

Обозначение элемента	Продолжительный ток (превышение температуры 270 °С), А	Сопротивление элемента, Ом	Число элементов в ящике	Сопротивление ящика, Ом	Постоянная времени нагрева T , с	Число витков	Размер ленты и диаметр проволоки, мм	Масса элемента, кг	Форма сечения проводника
НС413/0,2	42	0,2	10	2	180	15	10×1	—	Лента
НС413/0,26	37	0,26	10	2,6	180	15	10×0,8	—	
НС413/0,32	33	0,32	10	3,2	148	15	10×0,6	—	
НС413/0,40	30	0,4	10	4	132	15	10×0,5	—	
НС413/0,48	27	0,48	10	4,8	110	15	10×0,4	—	
НС413/0,64	23	0,64	10	6,4	100	15	10×0,3	—	
НС413/0,95	19	0,95	10	9,5	86	15	10×0,2	—	
НС413/1,3	16	1,3	10	13	75	15	10×0,15	—	
НС413/1,95	14	1,95	10	19,5	52	15	10×0,1	—	

Обозначение элемента	Продолжительный ток (превышение температуры 270 °С), А	Сопротивление элемента, Ом	Число элементов в ящике	Сопротивление ящика, Ом	Постоянная времени нагрева T, с	Число витков	Размер ленты и диаметр проволоки, мм	Масса элемента, кг	Форма сечения проводника
НС414/0,7	22,3	0,7	10	7	286	36×2	2	1,378	Проволока
НС414/0,9	19,9	0,9	10	9	237	36×2	1,8	1,265	
НС414/1,1	17,7	1,1	10	11	203	36×2	1,6	1,165	
НС414/1,26	16,7	1,26	10	12,6	187	36×2	1,5	1,018	
НС414/1,45	15,4	1,45	10	14,5	169	36×2	1,4	1,074	
НС414/1,95	13,8	1,95	10	19,5	132	36×2	1,2	1	
НС414/2,8	11,2	2,8	10	28	282	74	2	1,344	
НС414/3,5	10,1	3,5	10	35	235	74	1,8	1,254	
НС414/4,4	8,9	4,4	10	44	203	74	1,6	1,056	
НС414/5	8,4	5	10	50	200	74	1,5	1,111	
НС414/5,8	7,7	5,8	10	58	168	74	1,4	1,065	
НС414/8	6,6	8	10	80	132	74	1,2	0,994	
НС414/12	5,4	12	10	120	175	112	1,2	1,061	
НС414/14	5,0	14	10	140	116	112	1,1	1,011	
НС414/18	4,4	18	10	180	132	112	1	0,754	
НС414/21,6	4,0	21,6	10	216	112	112	0,9	0,713	
НС414/27,6	3,5	27,6	10	276	104	112	0,8	0,677	
НС414/37	3,1	37	10	370	122	150	0,8	0,723	
НС414/48	2,7	48	10	480	104	150	0,7	0,679	
НС414/68	2,3	68	10	680	86,5	150	0,6	0,641	
НС414/96	1,9	96	10	960	75	150	0,5	0,608	
НС414/140	1,6	140	10	1400	67	150	0,4	0,584	
НС414/188	1,4	188	10	1880	62,8	150	0,35	0,572	
НС414/260	1,2	260	10	2600	41,5	150	0,3	0,502	

**Технические данные нормализованных ящиков резисторов
типа ЯСЗ с ленточными и проволочными элементами**

Обозначение ящика	Сопротив- ление, Ом	Ток продол- жительного режима (пре- вышение тем- пературы 300°C), А	Число элементов в ящике	Масса ящика, кг	Форма се- чения провод- ника
ЯСЗ-0,64×11	0,64×11	23,4	11	14	Лента
ЯСЗ-0,48×11	0,48×11	27	11	14	
ЯСЗ-0,4×11	0,4×11	29,5	11	15	
ЯСЗ-0,32×11	0,32×11	33	11	15	
ЯСЗ-0,26×11	0,26×11	36,6	11	17	
ЯСЗ-0,2×11	0,2×11	42	11	17	
ЯСЗ-260×11	260×11	1,2	11	13	Про- волока
ЯСЗ-188×11	188×11	1,4	11	13	
ЯСЗ-140×11	140×11	1,6	11	13	
ЯСЗ-96×11	96×11	1,9	11	13	
ЯСЗ-68×11	68×11	2,3	11	14	
ЯСЗ-48×11	48×11	2,7	11	14	
ЯСЗ-37×11	37×11	3,1	11	15	
ЯСЗ-27,6×11	27,6×11	3,5	11	14	
ЯСЗ-21,6×11	21,6×11	4,0	11	15	
ЯСЗ-18×11	18×11	4,4	11	15	
ЯСЗ-12×11	12×11	5,4	11	16	
ЯСЗ-8×11	8×11	6,6	11	15	
ЯСЗ-5,8×11	5,8×11	7,7	11	16	
ЯСЗ-4,4×11	4,4×11	8,9	11	16	
ЯСЗ-3,5×11	3,5×11	10,1	11	18	
ЯСЗ-2,8×11	2,8×11	11,2	11	19	
ЯСЗ-1,95×11	1,95×11	13,8	11	15	
ЯСЗ-1,45×11	1,45×11	15,4	11	16	
ЯСЗ-1,1×11	1,1×11	17,7	11	17	
ЯСЗ-0,9×11	0,9×11	19,9	11	18	
ЯСЗ-0,7×11	0,7×11	22,3	11	19	

0,00002°C⁻¹. Поэтому они хороши там, где требуется стабильность сопротивления, например в цепях возбуждения.

Один проволочный или ленточный элемент любого номера может длительно рассеивать при превышении температуры 270°C мощность около 350 Вт, а следовательно, один ящик с 10 элементами — 3,5 кВт.

5. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Составление схем соединения элементов является последней стадией расчета резисторов, и к ней приступают лишь после определения сопротивлений секций и эквивалентных по превышению температуры продолжительных токов.

Во всех случаях, когда эквивалентные по нагреву продолжительные токи находятся по готовым таблицам (например, табл. 2-11 или

5-3 — 5-5) или же как эквивалентные по теплоте, выбор номеров ящиков резисторов производится после их определения.

Если для рассматриваемого привода нет готовых таблиц, а режим нагрузки кратковременный или повторно-кратковременный, но с очень малой ПВ и со значительными рабочими периодами, расчет эквивалентных по нагреву токов должен вестись при помощи кривых рис. 5-6 или формул (5-16), (5-12), (5-14). В этих случаях требуется знать постоянную времени нагрева резистора T , для чего приходится предварительно задаваться определенным номером ящика резисторов и затем проверять его соответствие.

Число соединений (перемычек) между элементами и ящиками резисторов должно быть минимальным, так как соединения усложняют монтаж и замену ящиков резисторов. По этим причинам желательно обходиться последовательным соединением элементов без параллельных ветвей.

Практически невозможно обойтись без параллельных ветвей: они нужны для разветвления больших токов по условиям нагрева и для получения требуемых сопротивлений секций. Особенно часто параллельные ветви приходится применять для крупных двигателей, для которых соединяются параллельно не только отдельные элементы, но нередко по несколько комплектных ящиков.

В некоторых случаях, обычно для крупных ответственных приводов, бывает желательным набрать сопротивления из ящиков одного номера. Это дает возможность, поставив рядом с рабочими ящиками резисторов один запасный, иметь возможность быстрой замены любого рабочего ящика, вышедшего из строя.

При выборе номеров элементов или ящиков и составлении схем соединений приходится комбинировать звенья резисторов. Для облегчения комбинирования рассмотрим, как определять сопротивления и допускаемые токи секций, составленных из отдельных звеньев с последовательным, параллельным и смешанным соединениями.

СОПРОТИВЛЕНИЯ СЕКЦИЙ

На рис. 5-21 показаны схемы резисторов с последовательным, параллельным и смешанным соединениями звеньев. Звеньями могут

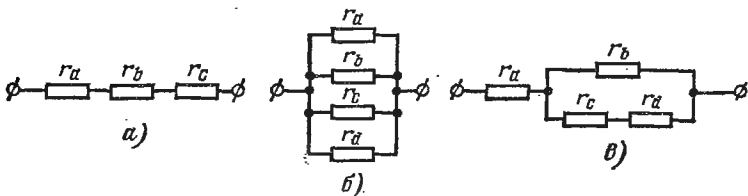


Рис. 5-21. Схемы секций резисторов с последовательным (а), параллельным (б) и смешанным (в) соединениями звеньев.

быть части элементов (только в случае проволочных и ленточных элементов), целые элементы и даже целые ящики резисторов.

Общее сопротивление секции при последовательном соединении звеньев (рис. 5-21, а) равно:

$$r = r_a + r_b + r_c; \quad (5-21)$$

при параллельном соединении (рис. 5-21, б):

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_d}}; \quad (5-22)$$

при смешанном соединении (рис. 5-21, в):

$$r = r_a + \frac{1}{\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c + r_d}}. \quad (5-23)$$

В тех случаях, когда секция составляется из звеньев с однородными элементами, расчеты сопротивления могут значительно упроститься, если определить эквивалентное число последовательных элементов и умножить его на сопротивление одного элемента.

Параллельные соединения наиболее часто составляются из двух звеньев; в этих случаях для определения сопротивления секции удобнее пользоваться не (5-22), а вытекающим из него выражением

$$r = \frac{r_a r_b}{r_a + r_b} \quad \text{или} \quad r = \frac{ab}{a + b} \rho.$$

Второе равенство составлено для однородных элементов с числами a и b в каждом звене при сопротивлении элемента, равном ρ .

ДОПУСКАЕМЫЕ ТОКИ ДЛЯ СЕКЦИЙ

При последовательном соединении звеньев (рис. 5-21, а) допускаемый ток секции определяется звеном, допускающим наименьший ток.

Очевидно, что наилучшее использование материала при последовательном соединении звеньев получится в том случае, если элементы выбраны с одинаковыми допускаемыми токами.

При параллельном соединении звеньев допускаемый ток в секции получается сложением токов звеньев, при этом значение его ограничивается тем звеном, в котором допускаемый ток получается при меньшем напряжении, другими словами, для которого произведение допускаемого тока на сопротивление дает наименьшее значение.

Пусть звено r_a (рис. 5-21, б) допускает ток $I_{да}$ и для него среди других параллельных звеньев произведение $I_{да} r_a$ имеет минимальное значение. Очевидно, что из условий нагрева напряжения секции не должно быть больше $I_{да} r_a$, при этом сумма токов всех параллельных звеньев составит допускаемый ток секции:

$$I_d = I_{да} + \frac{I_{да} r_a}{r_b} + \frac{I_{да} r_a}{r_c} + \frac{I_{да} r_a}{r_d},$$

откуда находим:

$$\left. \begin{aligned} I_d &= I_{да} \left(1 + \frac{r_a}{r_b} + \frac{r_a}{r_c} + \frac{r_a}{r_d} \right) \\ &\text{при } I_{да} r_a < I_{дб} r_b, I_{дс} r_c, I_{да} r_d. \end{aligned} \right\} \quad (5-24)$$

Наилучшее использование материала при параллельном соединении звеньев будет в том случае, когда элементы выбраны с равными произведениями из сопротивлений звеньев на допускаемые токи. Если

секция составлена из однородных элементов, то ограничивающим окажется звено, имеющее наименьшее количество элементов.

При смешанном соединении звеньев допускаемый ток секции определяется путем превращения параллельных комплектов звеньев в эквивалентные по допускаемому току единичные звенья; затем, получив схему последовательных звеньев, ток определяют по самому слабому для тока звену.

Пример 5-5. Определить сопротивление и допускаемый продолжительный ток для секции, состоящей из ящика типа Н, № 40 с чугунными элементами, соединенными по схеме рис. 5-22.

Решение. Развертка схемы секции получится, как показано на рис. 5-23.

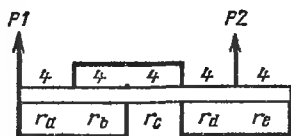


Рис. 5-22. Схема секции резистора, составленная из стандартного ящика № 40.

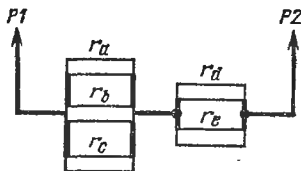


Рис. 5-23. Развертка схемы секции резистора по рис. 5-22.

Поскольку звенья имеют одинаковые числа однородных элементов — по 4 шт., эквивалентное число элементов $n_{\text{э}}$ найдется очень просто:

$$n_{\text{э}} = \frac{4}{3} + \frac{4}{2} = \frac{10}{3}.$$

Сопротивление элемента

$$\rho = \frac{40}{1000} = 0,04 \text{ Ом.}$$

Сопротивление секции

$$r_{P1-P2} = n_{\text{э}} \rho = \frac{10}{3} 0,04 = 0,135 \text{ Ом.}$$

Допускаемый ток секции будет ограничиваться звеньями r_d и r_e . По табл. 5-7 допускаемый продолжительный ток для элементов № 40 составляет $I_{\text{д.эл}} = 76 \text{ А}$.

Допускаемый продолжительный ток для секции определится:

$$I_{P1-P2} = 76 \cdot 2 = 152 \text{ А.}$$

Очевидно, что звенья r_a , r_b , r_c использованы не полностью.

Пример 5-6. Определить сопротивление и допускаемый продолжительный ток для секции, состоящей из стандартных ящиков № 55, 75 и 105, соединенных по схеме рис. 5-24.

Решение. По табл. 5-7 имеем:

ящик № 55, $r_a = 1,1 \text{ Ом}$, $I_{\text{да}} = 64 \text{ А}$;

ящик № 75, $r_b = 3,0 \text{ Ом}$, $I_{\text{дб}} = 39 \text{ А}$;

ящик № 105, $r_c = 4,2 \text{ Ом}$, $I_{\text{дс}} = 33 \text{ А}$.

Сопротивление сѣкции опредѣлится:

$$r_{P1-P2} = r_a + \frac{r_b r_c}{r_b + r_c} = 1,1 + \frac{3 \cdot 4,2}{3 + 4,2} = 2,85 \text{ Ом.}$$

Допускаемый ток сѣкции равен допускаемому току либо ящика № 55 (r_a), либо параллельно соединенных ящиков № 75 и 105 (r_b, r_c): это зависит от того, какой из допускаемых токов меньше.

Найдем вначале, какая из параллельных ветвей (b или c) будет ограничивающей

$$I_{db} r_b = 39 \cdot 3,0 = 117 \text{ В;}$$

$$I_{dc} r_c = 33 \cdot 4,2 = 138,6 \text{ В,}$$

т. е. в звене r_b допускаемый ток получится при меньшем напряжении, чем в звене r_c , а следовательно, звено будет ограничивать ток параллельного соединения.

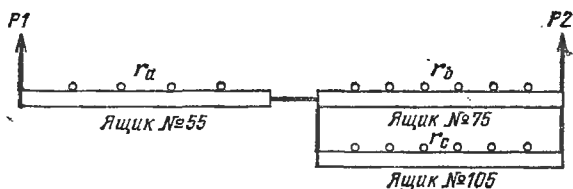


Рис. 5-24. Схема резистора, состоящего из трех стандартных ящиков: № 55, 75 и 105.

Допускаемый продолжительный ток параллельно соединенных звеньев по (5-24) равен:

$$I_{д(b, c)} = I_{db} \left(1 + \frac{r_b}{r_c} \right) = 39 \left(1 + \frac{3}{4,2} \right) = 67 \text{ А.}$$

Этот ток больше допускаемого тока последовательного звена r_a , поэтому ток сѣкции ограничивается последним. Таким образом, допускаемый ток сѣкции равен:

$$I_{д(P1-P2)} = I_{da} = 64 \text{ А.}$$

Пример 5-7. Рассчитать резистор для удлинительного рольганга реверсивного прокатного стана. Применен асинхронный двигатель с фазным ротором типа МТ-72-10, 380 В, 100 кВт, 584 об/мин, ПВ=25%, $E_{р.н} = 368 \text{ В}$, $I_{р.н} = 170 \text{ А}$. Двигатель управляется по схеме рис. 3-22, но с двумя ступенями ускорения вместо показанных трех и одной ступенью противовключения.

Решение. Для расчета резисторов воспользуемся данными относительных сопротивлений и токов табл. 5-4.

Расчет будем вести при помощи вспомогательной табл. 5-12, причем для сравнения рассчитаем два варианта: стандартные ящики с чугунными элементами и ящики типа КФ с фехралевыми элементами (результаты для фехралевых резисторов даны в скобках).

Предварительно найдем номинальное сопротивление ротора

$$R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{\sqrt{3} I_{р.н}} = \frac{368}{\sqrt{3} \cdot 170} = 1,25 \text{ Ом.}$$

Степень		Сопротивление			Ток продолжительный		
		требуется		подобрано, Ом	требуется		подобрано, А
		относительное	Ом		относительный	А	
Вторая ускорения	(r_2)	0,07	0,0875	0,08 (0,077)	0,6	102	107 (107)
$СП13-СП12=СП23-СП22=СП33-СП32$							
Первая ускорения	(r_1)	0,22	0,275	0,28 (0,308)	0,5	85	107 (107)
$СП12-СП11=СП22-СП21=СП32-СП31$							
Степень противовключения	$(r_{пр})$	0,67	0,838	0,84 (0,8)	0,35	60	76 (76)
$СП11-СП10=СП21-СП20=СП31-СП30$							

На рис. 5-25 приведены составленные схемы для ящиков с чугунными и фехралевыми элементами. В обоих случаях получилось по шесть ящиков резисторов, что и следовало ожидать, так как технические данные ящиков одинаковы.

Цифры, проставленные над резисторами, указывают число элементов между соседними зажимами. В ящиках № 20 с чугунными эле-

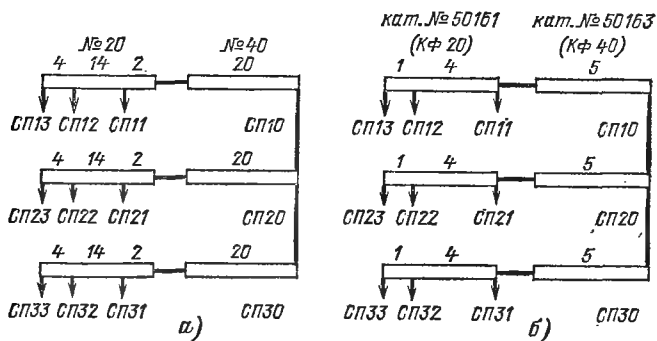


Рис. 5-25. Схемы резисторов пусковых и противовключения для асинхронного двигателя типа МТ-72-10, 380 В, 100 кВт, 584 об/мин.

а — стандартные ящики с чугунными элементами; б — ящики типа КФ с фехралевыми элементами.

ментами пришлось переставить зажимы, чтобы получить указанную нестандартную разбивку сопротивлений секций. При этом учитывалось, что число элементов между зажимами должно быть четным, чтобы все зажимы были с одной стороны ящика (см. рис. 5-12). Для фехралевых резисторов, как видно из рис. 5-18, а, числа элементов между зажимами могут быть и нечетными, что и использовано в схеме рис. 5-25, б.

Пример 5-8. Кран на электрокаре имеет три привода: подъем крюка, подъем стрелы и поворот стрелы. Все эти приводы работают от одного двигателя, включаясь поочередно сцепной муфтой.

Применен двигатель последовательного возбуждения 5,4 кВт, 80 В, 1200 об/мин при ПВ=25%, который получает питание от аккумуляторной батареи.

Двигатель управляется по схеме рис. 5-26.

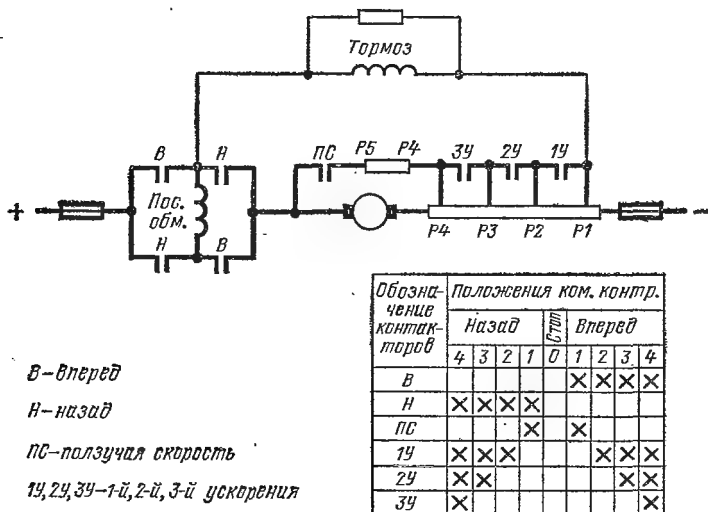


Рис. 5-26. Схема управления двигателем крана электрокара.

Из приведенного расчета известно, что сопротивления секций и эквивалентные по теплоте продолжительные токи (кран работает с ПВ до 30% и до 400 включений в час) равны:

$$P5-P4 = 0,70 \text{ Ом, } 15 \text{ А;}$$

$$P4-P3 = 0,23 \text{ Ом, } 45 \text{ А;}$$

$$P3-P2 = 0,34 \text{ Ом, } 35 \text{ А;}$$

$$P2-P1 = 0,40 \text{ Ом, } 25 \text{ А.}$$

Требуется выбрать резисторы и составить схему соединения.

Решение. Учитывая ограниченное место на электрокаре, а также условия безопасности для машиниста, желательно иметь наиболее компактные резисторы и притом защищенные. Трубки резисторов не подходят по току: их пришлось бы установить большее количество с большим количеством параллельных ветвей и установка получилась бы громоздкой и малонадежной. Для данных условий хорошо подойдут ящики типа СБ с проволочными или ленточными элементами; они имеют защитный кожух и достаточно компактны.

На основании кривых рис. 5-6 нетрудно убедиться, что для проволочных и ленточных элементов при указанных в условии ПВ и частоте включений двигателя эквивалентные по превышению температуры токи весьма незначительно превышают эквивалентные по теплоте, а потому будем пользоваться последними.

Для ступени $P5-P4$ (рис. 5-27) с эквивалентным по теплоте током 15 А примем ленточный элемент HC413/0,95 на 19 А. Полное сопротивление этого элемента, соответствующее 15 виткам, равно 0,95 Ом.

Для того чтобы получить требуемое сопротивление 0,70 Ом, необходимо иметь:

$$0,70 \frac{15}{0,95} = 11 \text{ витков.}$$

Для ступени $P4-P3$ выбираем два элемента HC413/0,48 и соединяем их параллельно; для ступени $P3-P2$ — два элемента HC413/0,64

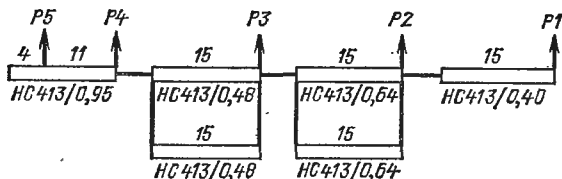


Рис. 5-27. Схема резистора из ленточных элементов для двигателя крана электрокара.

и соединяем также параллельно, для ступени $P2-P1$ — один элемент HC413/0,40. Для проверки и сравнения расчетов целесообразно результаты сводить в таблицу.

Таблица 5-13

Ступень	Сопротивление, Ом		Ток продолжительный, А	
	требуется	подобрано	требуется	подобрано
$P5-P4$	0,70	0,697	15	19
$P4-P3$	0,23	0,24	45	54
$P3-P2$	0,34	0,32	35	46
$P2-P1$	0,40	0,40	25	30
Всего ($P5-P1$)	1,67	1,657	—	—

Из приведенной табл. 5-13 видно, что подобранные элементы дают по сопротивлениям результаты, почти совпадающие с расчетными, а по току дают небольшой запас. Неиспользованными оказались всего лишь четыре витка у элемента HC413/0,95 секции $P5-P4$ (рис. 5-27).

Выбранные шесть элементов комплектуют в ящике СБ-8, допускающем установку до восьми элементов.

Пример 5-9. Для управления газовым вентилем установлен двигатель параллельного возбуждения 1,0 кВт, 220 В, управляемый по схеме рис. 5-28.

Пуск двигателя на закрывание или открывание вентиля осуществляется ключом K , а остановка в открытом и закрытом положениях —

цепями 1ПВ и 2ПВ путевого выключателя, связанного с механизмом вентиля.

Как видно из схемы, двигатель в обоих направлениях пускается через постоянно включенные секции резистора и останавливается динамическим торможением с использованием для этого частей пускового резистора.

Двигатель пускается до 600 раз в час.

Из расчета резистора известно:

а) $r_1 = r_2 = r_3 = 5 \text{ Ом}$;

б) эквивалентный по теплоте ток за полный цикл приблизительно одинаков для всех секций резистора и равен примерно 2,5 А.

Решение. Поскольку двигатель имеет мощность всего лишь 1 кВт, выберем для него в качестве пусковых и тормозных резисторов трубки, дешевые по цене и малые по габаритам.

Выбираем с запасом по току три трубки типа ПЭВ-150, каждая с сопротивлением 5 Ом и допускаемым током 5,5 А.

Пример 5-10. Рассчитать разрядный резистор для параллельной обмотки возбуждения двигателя типа МП-82, 220 В, 100 кВт, 475 об/мин, ПВ=25%, $2p = 4$, $r_{\text{пар}} = 35,8 \text{ Ом}$, $w = 1450$ витков, $I_{\text{н}} = 4,55 \text{ А}$, $\Phi_{\text{н}} = 9,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$ (см. приложение 4). Разрядный резистор подключается к обмотке возбуждения двигателя через диод, как показано на схеме рис. 5-29.

Решение. Примем согласно § 2-12

$$r_{\text{разр}} = r_{\text{пар}} = 35,8 \text{ Ом}.$$

Для выбора резистора по нагреву определим по (2-61) электромагнитную статическую постоянную времени контура, состоящего из параллельной обмотки возбуждения двигателя, разрядного резистора и диода (сопротивлением диода пренебрегаем):

$$T_{\text{стат}} = \frac{2pw}{r_{\text{пар}} + r_{\text{раз}} \frac{\Phi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}}} k_S = \frac{4 \cdot 1450}{(35,8 + 35,8)} \cdot \frac{9,7 \cdot 10^{-2}}{4,55} 1,2 = 2,08 \text{ с}.$$

По (2-60) найдем эквивалентное время неизменного разрядного тока:

$$t_{\text{э}} = T_{\text{стат}}/2 = 2,08/2 = 1,04 \text{ с}.$$

Применим трубчатый резистор, имеющий постоянную времени нагрева $T \approx 200 \text{ с}$.

Считая три подряд разряда обмотки возбуждения на разрядный резистор, получаем время рабочего периода:

$$t_p = 3t_{\text{э}} = 3 \cdot 1,04 = 3,12 \text{ с.}$$

Ток рабочего периода $I_p = i_n = 4,55 \text{ А.}$

Отношение

$$\frac{t_p}{T} = \frac{3,12}{200} = 0,0156.$$

По кривым рис. 5-6 для $t_p/T = 0,0156$ и ПВ = 0 находим:

$$I_{\text{э. п}}/I_p = 0,1,$$

эквивалентный по превышению температуры продолжительный ток

$$I_{\text{э. п}} = 0,1I_p = 0,1 \cdot 4,55 = 0,455 \text{ А.}$$

По сопротивлению $r_{\text{разр}} = 35,8 \text{ Ом}$ и току $I_{\text{э. п}} = 0,455 \text{ А.}$ выбираем трубчатый резистор типа ПЭВ=75, 35 Ом, 1,5 А.

Разрядный резистор выбран со значительным запасом по току в соответствии с рекомендациями эксплуатации.

Сопоставление формул со старыми и новыми единицами величин

Формулы со старой системой единиц	Формулы с применением системы единиц СИ	Номера формул в книге
$dt = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{M_{\text{дн}}}$	$dt = J \frac{d\omega}{M_{\text{дн}}} = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{M_{\text{дн}}}$	(1-7) и перед (2-27)
$t_{xy} = \frac{GD^2}{375} \frac{n_y - n_x}{M_{\text{дн}}}$	$t_{xy} = \frac{J}{9,55} \frac{n_y - n_x}{M_{\text{дн}}}$	(1-9')
$t_{xy} = \frac{GD^2}{163} \frac{n_y - n_x}{M_{\text{дн}x} - M_{\text{дн}y}} \lg \frac{M_{\text{дн}x}}{M_{\text{дн}y}}$	$t_{xy} = \frac{1}{4,15} \frac{n_y - n_x}{M_{\text{дн}x} - M_{\text{дн}y}} \lg \frac{M_{\text{дн}x}}{M_{\text{дн}y}}$	(1-13')
$\varphi_{xy} = \frac{GD^2}{45\,000} \frac{n_y^2 - n_x^2}{M_{\text{дн}}}$	$\varphi_{xy} = \frac{J}{1146} \frac{n_y^2 - n_x^2}{M_{\text{дн}}}$	(1-15')
$\varphi_{xy} = \frac{GD^2}{22\,500} C \left[(CM_{\text{дн}x} + n_x) 2,3 \lg \frac{M_{\text{дн}x}}{M_{\text{дн}y}} - (n_y - n_x) \right]$	$\varphi_{xy} = \frac{J}{573} C \left[(CM_{\text{дн}x} + n_x) 2,3 \lg \frac{M_{\text{дн}x}}{M_{\text{дн}y}} - (n_y - n_x) \right]$	(1-17')
$T_{\text{м}} = \frac{GD^2}{375} \frac{n_0}{M_{\text{н}}}$	$T_{\text{м}} = \frac{J}{9,55} \frac{n_0}{M_{\text{н}}}$	(2-29)
$T_{\text{эм}} = \frac{GD^2}{375} \frac{n_0 r_{\text{д}*}}{M_{\text{н}}}$	$T_{\text{эм}} = \frac{J}{9,55} \frac{n_0 r_{\text{д}*}}{M_{\text{н}}}$	После (2-29)

Формулы со старой системой единиц	Формулы с применением системы единиц СИ	Номера формул в книге
$M = 975 \frac{P}{n}$	$M = 9550 \frac{P}{n} = 1000 \frac{P}{\omega}$	Пример 2-3 к рис. 2-9
$E = \frac{10^{-8}}{60} \frac{pN}{a} \Phi n = C_E \Phi n$	$E = \frac{1}{60} \frac{pN}{a} \Phi n = C_E \Phi n$	(2-4)
$M = \frac{10^{-8}}{9,81\pi \cdot 2} \frac{pN}{a} \Phi I_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}$	$M = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} \Phi I_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}$	(2-5)
$\frac{C_E}{C_{\text{м}}} = 1,027$	$\frac{C_E}{C_{\text{м}}} = 0,105$	(2-6)
$T_{\text{э}} = \frac{m\omega}{r_{\text{пар}}} \frac{d\Phi}{di} k_s \cdot 10^{-8}$	$T_{\text{э}} = \frac{m\omega}{r_{\text{пар}}} \frac{d\Phi}{di} k_s$	(2-24)
$T_{\text{э}} = \frac{\omega}{r_{\text{пол}}} \frac{d\Phi}{di_{\text{пол}}} k_s \cdot 10^{-8}$	$T_{\text{э}} = \frac{\omega}{r_{\text{пол}}} \frac{d\Phi}{di_{\text{пол}}} k_s$	(2-24')
$T_{\text{стат}} = \frac{m\omega}{r_{\text{пар}} + r_{\text{раз}}} \frac{\Phi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}} k_s \cdot 10^{-8}$	$T_{\text{стат}} = \frac{m\omega}{r_{\text{пар}} + r_{\text{раз}}} \frac{\Phi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}} k_s$	(2-61)
$M = 7,2 m_c k_c \omega p \Phi I'_p \cos \varphi_p \cdot 10^{-6}$	$M = 0,71 m_c k_c \omega p \Phi I'_p \cos \varphi_p$	(3-36)

Формулы со старой системой единиц	Формулы с применением системы единиц СИ	Номера формул в книге
$M = 2,92 \frac{I_p^2 R}{n_c S}$	$M = 28,6 \frac{I_p^2 R}{n_c S}$	(3-37), (3-57), (3-63), (3-68), (3-73), (4-16)
$M = \frac{2,92}{n_c} (I'_p)^2 \left(\frac{R'_p}{n_*} \right)$	$M = \frac{28,6}{n_c} (I'_p)^2 \left(\frac{R'_p}{n_*} \right)$	(3-77)
$T_{эм} = \frac{GD^2 n_{cS_{H. и}}}{375 M_H}$	$T_{эм} = \frac{J n_{cS_{H. и}}}{9,55 M_H}$	(3-80) (3-80')

ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН В ФОРМУЛАХ, ПРИВЕДЕННЫХ ВЫШЕ

 t, T — с; GD^2 — кгс · м²; n — об/мин ($n = 9,55 \omega$); φ — обороты; M — кгс · м (1 кгс · м = 9,81 Н · м); P — кВт; i, I — А; Φ — Мкс (1 Мкс = 10^{-8} Вб); r, R — Ом; t, T — с; J — кг · м² ($J = \frac{1}{4} GD^2$) — см. формулу (1-6); n — об/мин, или ω — рад/с ($\omega = 0,105 n$); φ — обороты; M — Н · м (1 Н · м = $\frac{1}{9,81}$ кгс · м); P — кВт; i, I — А; Φ — Вб (1 Вб = 10^8 Мкс); r, R — Ом

Ньютон (Н) — сила, которая массе 1 кг сообщает ускорение, равное 1 м/с².

Вебер (Вб) — магнитный поток, при равномерном убывании которого до нуля за 1 с в контуре, сцепленном с этим потоком, возникает э. д. с. индукции, равная 1 В.

Примечание. Определение цифровых множителей в формулах с новой системой единиц:

$$9,55 = \frac{60}{2\pi}; 1146 = 2 \left(\frac{60}{2\pi} \right)^2 2\pi; 9550 = \frac{60 \cdot 1000}{2\pi}; 4,15 = \frac{60}{2,3 \cdot 2\pi}; 573 = \left(\frac{60}{2\pi} \right)^2 2\pi; 0,105 = \frac{2\pi}{60}; 28,6 = \frac{3 \cdot 60}{2\pi}.$$

Двигатели постоянного тока продолжительного режима типа ПН, 220 В
защищенные с регулированием частоты вращения до 1 : 2

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	$I_{я, H}$, А	Число активных проводников якоря Z_N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число полюсов $2p$	Сопротивление			Витков на полюс		Номинальный ток параллельной обмотки I_H , А	Номинальный ток полюса Φ , мВб	Момент инерции якоря J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
							Якорь + добавочные полюсы $r_{я} + r_{д.п.}$, Ом	Стабилизирующая обмотка $r_{ом}$, Ом	Параллельная обмотка $r_{пар}$, Ом	Стабилизирующая обмотка $\omega_{пос}$	Параллельная обмотка $\omega_{пар}$				
ПН-45	6,6	2200—2400	35,0	522	2	4	0,26	0,043	298	9	2300	0,6	5,4	0,07	107
	4,4	1500—2100	23,5	812	2	4	0,60	0,043	298	9	2300	0,6	5,0		
	2,5	1000—1950	14,1	1218	2	4	1,37	0,11	372	12	2400	0,48	4,8		
ПН-68	10,0	2250—2400	52,2	496	2	4	0,17	0,012	188	6	1900	0,95	5,6	0,125	135
	6,5	1550—2000	35,0	744	2	4	0,364	0,012	250	6	2200	0,71	5,2		
	3,7	1000—1750	21,0	1116	2	4	0,89	0,05	250	11	2200	0,71	5,2		
ПН-85	9,0	1500—2000	48,0	496	2	4	0,22	0,02	228	6	1750	0,78	8,3	0,16	175
	5,6	1000—1750	30,0	744	2	4	0,48	0,04	228	8	1750	0,78	8,1		
	15,0	1560—2000	81,5	556	2	4	0,143	0,004	96	4	1500	1,8	7,1		
ПН-100	10,0	1090—1900	55,0	834	2	4	0,33	0,009	136	6	1800	1,3	6,6	0,4	290
	5,8	780—1500	34,0	1112	2	4	0,621	0,013	136	6	1800	1,3	7,0		
	21,0	1500—1900	110	420	2	4	0,09	0,004	150	4	1700	1,2	9,7		
ПН-145	13,5	1050—1800	73,0	556	2	4	0,12	0,006	150	4	1700	1,2	10,5	0,5	330
	8,5	780—1500	46,5	834	2	4	0,36	0,014	166	8	1700	1,1	9,3		
	33,5	1580—1900	174	350	2	4	0,054	0,002	92	3	1500	1,9	11,2		
ПН-205	20,5	970—1700	110	556	2	4	0,08	0,006	92	6	1500	1,9	11,4	1,0	480
	14,0	750—1500	76	700	2	4	0,22	0,01	92	8	1500	1,9	11,5		
	46,5	1500—1800	238	278	2	4	0,035	0,002	59	3	1250	3,0	15,0		
ПН-290	29,0	1000—1600	151	396	2	4	0,070	0,002	57	3	1250	3,1	15,5	1,2	530
	19,0	750—1300	102	524	2	4	0,122	0,007	86	6	1400	2,1	15,6		

Примечания: 1. Сопротивления даны при температуре 15°C.
 2. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1954 г.

Двигатели постоянного тока продолжительного режима типа ПН, 220 В
защищенные с регулированием частоты вращения 1:3 и 1:4

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	$I_{я.н.}$, А	Число активных проводников якоря Λ	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число полюсов $2p$	Сопротивление			Витков на полюс		Номинальный ток параллельной обмотки I_H , А	Номинальный ток полюса Φ , мБб	Момент инерции якоря J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
							Якорь + добавочные полюсы $r_{я} + r_{д.п.}$, Ом	Стабилизирующая обмотка $r_{пос.}$, Ом	Параллельная обмотка $r_{пар.}$, Ом	Стабилизирующая обмотка $w_{пос.}$	Параллельная обмотка $w_{пар.}$				
ПН-28,5	0,74	700—2100	4,7/5,2	2668	2	4	6,20	0,18	452	20	2700	0,39	3,0	0,0575	96
ПН-45	1,2	700—2100	7,1/7,7	1740	2	4	3,07	0,141	340	15	2150	0,52	4,7	0,07	107
ПН-68	1,45	700—2100	8,5/9,2	1798	2	4	2,49	0,182	312	20	2300	0,57	4,8	0,125	138
ПН-85	2,3	700—2100	13,7/15,5	1054	2	4	1,24	0,0712	246	13	1800	0,72	8,1	0,16	175
ПН-100	2,7	600—1800	17/20,1	1470	2	4	1,94	0,0029	175	3	2000	1,00	6,4	0,4	290
ПН-145	4,2	600—1800	24/27	1112	2	4	1,71	0,0073	162	4	1800	1,10	9,2	0,5	330
ПН-205	6,5	550—1650	37,5/43	1112	2	4	0,58	0,0036	120	6	1800	1,48	10,2	0,95	480
ПН-290	9,5	550—1650	53/57,5	786	2	4	0,35	0,0069	96,4	5	1500	1,84	15,0	1,15	530
ПН-400	14,5	500—1500	78/83	684	2	4	0,23	0,005	77,2	6	1470	2,3	18,0	2,25	795
ПН-550	18,5	500—1500	93/103	564	2	4	0,18	0,00292	65,2	4	1250	2,7	24,0	2,68	900
ПН-750	17,5	400—1200	94/105	668	2	4	0,19	0,00464	75,6	5	1600	2,3	25,0	5,85	1210
ПН-1000	24,0	400—1200	126/138	498	2	4	0,12	0,00308	63	4	1400	2,8	33,0	6,74	1450
ПН-1320	29,0	400—1200	153/170	462	2	4	0,085	0,00214	39,2	4	1200	4,5	35,0	13,1	1810
ПН-1750	33,0	400—1200	172/186	378	2	4	0,062	0,00122	33,4	3	1050	5,3	48,0	14,3	2030

Тип	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$I_{\text{я. н}}$, А	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число полюсов $2p$	Сопротивление			Витков на полюс		Номинальный ток параллельной обмотки $I_{\text{н}}$, А	Номинальный поток полюса Φ , мВб	Момент инерции якоря J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
							Якорь + добавочные полюсы $r_{\text{я}} + r_{\text{д. п}}$, Ом	Стабилизирующая обмотка $r_{\text{пос}}$, Ом	Параллельная обмотка $r_{\text{пар}}$, Ом	Стабилизирующая обмотка $w_{\text{пос}}$	Параллельная обмотка $w_{\text{пар}}$				
ПН-28,5	0,44	530—2120	3,0/3,7	3480	2	4	10,79	0,251	492	24	3000	0,36	3,1	0,0575	96
ПН-85	1,25	500—2000	7,5/7,9	1488	2	4	2,35	0,145	246	16	1800	0,72	8,3	0,16	175
ПН-205	4,5	450—1800	27/34,8	1320	2	4	0,92	0,0096	95,2	6	1500	1,85	11,0	0,95	408
ПН-290	5,5	400—1600	32/39	1176	2	4	0,88	0,0069	114	5	1550	1,60	12,8	1,15	530
ПН-400	9,0	400—1600	49/55,5	820	2	4	0,33	0,005	77,2	6	1470	2,3	18,0	2,25	795
ПН-550	12,0	400—1600	65/72	684	2	4	0,26	0,00292	65,2	4	1250	2,7	24,0	2,68	900
ПН-1000	14,5	300—1200	77/90	668	2	4	0,214	0,00309	63	4	1400	2,8	33,0	6,72	1450
ПН-1750	19,0	300—1200	102/120	494	2	4	0,083	0,00456	33,4	5	1050	5,3	48,0	14,3	2030

Примечания: 1. Сопротивления даны при температуре 15°C.
 2. Таблица составлена по материалам заводов-изготовителей 1941 и 1946 гг.

Тип	Параллельного возбужде							
	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_a + r_{л.п.}$, Ом	$r_{пар}$, Ом	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $2b$
МП-12	2,5	1300	14,2	1,33	329	990	2	2270
МП-22	4,5	1100	26	0,87	168	856	2	1750
МП-32	9	900	48	0,348	138	642	2	1960
МП-41	12	685	64	0,243	91	620	2	1720
МП-42	16	700	84	0,168	81	492	2	1500
МП-51	23	600	120	0,0845	62	420	2	1825
МП-52	33	650	168	0,0495	59	278	2	1636
МП-62	46	580	231	0,0330	55,5	262	2	1750
МП-72	75	520	374	0,0133	40	178	2	1490
МП-82	100	475	500	0,01045	35,8	552	8	1450
МП-82а (См. примечание 11)	130	600	640	0,00585	35,8	432	8	1450

тока типа МП, 220 В, ПВ = 25%

ния		Последовательного возбуждения					
Магнитный поток полюса Ф полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки, А	P_n кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{\text{пос}}$, Ом	Число витков полюса последовательной обмотки w	Магнитный поток полюса Ф полезный, мВб
4,57	0,525	2,5	1000	15,6	0,89	$114 \frac{1}{2}$	5,30
6,09	0,955	4,5	880	28	0,26	$75 \frac{1}{2}$	7,12
10,2	1,25	9	750	52	0,143	$59 \frac{1}{2}$	11,7
14,1	1,75	12,5	680	72	0,088	$51 \frac{1}{2}$	14,6
17,6	1,97	17	680	92	0,056	$41 \frac{1}{2}$	18,7
24,5	2,55	25	575	134	0,032	$34 \frac{1}{2}$	24,7
34,7	2,75	35	575	185	0,028	$30 \frac{1}{2}$	37,7
41,2	2,93	50	510	260	0,02	$26 \frac{1}{2}$	45,1
68,7	4,07	80	460	405	0,0098	$19 \frac{1}{2}$	75,8
97,0	4,55	106	420	530	0,0068	$15 \frac{1}{2}$	107
99,0	5,1					$11 \frac{1}{2}$	100

Тип	Смешанного возбужде					
	P_H , кВт	n , об/мин	I_H , А	$r_{\text{пос}}$, Ом	$r_{\text{пар}}$, Ом	Число вит
						са парал- лельной обмотки
МП-12	2,5	1200	14,8	0,334	536	2100
МП-22	4,5	1100	26,5	0,098	420	2180
МП-32	9	900	50	0,063	290	2180
МП-41	12	680	66	0,065	210	2100
МП-42	16	700	86	0,036	236	2000
МП-51	24	580	128	0,020	140	1825
МП-52	34	650	175	0,0111	116	1550
МП-62	46	580	235	0,00885	116	1750
МП-72	75	520	380	0,0048	82	1490
МП-82	100	475	500	0,0028	73	1450
МП-82а (См. приме- чание 11)						1450

Примечания: 1. Все двигатели четырехполюсные, т. е. $2p=4$. Обмотки
 2. Величины сопротивлений даны при 20°C.
 3. Таблица составлена по материалам завода 1954 г.
 4. Данные якоря, приведенные для двигателя параллельного возбуждения,
 5. Катушки параллельной обмотки двигателей параллельного и смешанного
 6. Параллельные обмотки всех двигателей параллельного и смешанного
 ном токе.
 7. Двигатели параллельного возбуждения допускают регулировку частоты
 8. Двигатели параллельного возбуждения допускают повышение частоты
 9. Универсальные (средние) характеристики двигателей последовательного
 10. Двигатели, начиная с типа МП-41 и мощнее, имеют также продуваемое
 длительно (ПВ=100%) с мощностью, примерно указанной в таблице для режима
 11. Двигатель типа МП-82а имеет только продуваемое исполнение. Данные
 46 м³/мин, статический напор 930 Па (95 мм вод. ст.).

ния			Максимальная допускаемая частота вращения, об/мин	Момент инерции якоря J , кг · м ²	Масса двигателя Q , кг
ков полюсов	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки, А			
последовательной обмотки					
45 $\frac{1}{2}$	4,75	0,322	3250	0,05	130
28 $\frac{1}{2}$	5,95	0,412	3100	0,155	200
21 $\frac{1}{2}$	10,0	0,595	2600	0,305	335
24 $\frac{1}{2}$	13,8	0,78	2200	0,775	480
17 $\frac{1}{2}$	17,2	0,735	2100	0,95	570
17 $\frac{1}{2}$	24,9	1,18	2000	2,35	965
11 $\frac{1}{2}$	34,2	1,39	2000	3,03	1175
10 $\frac{1}{2}$	40,6	1,39	1800	5,5	1850
7 $\frac{1}{2}$	68,0	1,97	1600	14	2680
6 $\frac{1}{2}$	96,0	2,22	1470	25,3	3900
4 $\frac{1}{2}$	92,5	2,5	1470	25,3	3900

полюсов соединены последовательно.

являются общими и для двигателей последовательного и смешанного возбуждения. возбуждения соединены последовательно. возбуждения рассчитаны на длительное включение (ПВ = 100%) при номиналь-

вращения 1 : 2 ослаблением потока. вращения в пределах 1 : 2 повышением напряжения. и смешанного возбуждения приведены на рис. 2-41 и 2-63. исполнение, т. е. с независимой вентиляцией. При этом они могут работать ПВ = 25%. для него указаны при режиме ПВ = 100%. Охлаждающего воздуха требуется

Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа ДП, 220 В закрытые
с естественным охлаждением для режима ПВ = 25% и защищенные с независимой вентиляцией
(продуваемые) для режима ПВ = 100%

Тихоходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения										Последовательного возбуждения					
	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{я} + r_{д, п}$, Ом	$r_{пар}$, Ом	Число активных проводников якоря A	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки, I_n , А	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{пос}$, Ом	Число витков полюса последовательной обмотки $w_{пос}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб
ДП-12	3	1200	17,5	1,43	260	990	2	1800	4,6	0,65	3	960	19	0,59	83	5,2
ДП-21	4,5	1050	26	0,94	128	920	2	1650	5,8	1,24	4,5	900	28	0,275	82	6,25
ДП-22	6	1130	33	0,566	130	696	2	1480	7,4	1,18	6	850	36	0,30	82	8,9
ДП-31	8,5	870	47	0,423	107	738	2	1700	8,8	1,42	8,5	770	50	0,118	60	9,6
ДП-32	12	790	65	0,266	94	558	2	1470	13,2	1,6	12	675	68	0,097	48	14,7
ДП-41	16	710	85	0,177	70	492	2	1480	17,0	2,2	17	630	94	0,053	40	18,4
ДП-42	21	660	110	0,1155	65	372	2	1270	24,5	2,4	23	600	125	0,039	29	25,8
ДП-52	32	760	164	0,0545	58	278	2	1320	29,0	2,6	33	630	175	0,033	32	34
ДП-62	46	625	233	0,0332	42	222	2	1145	45,0	3,6	50	520	260	0,0205	27	51,5
ДП-72	67	590	338	0,0204	36	186	2	1140	57,0	4,3	75	470	385	0,0105	20	69
ДП-82	95	500	470	0,0117	34,4	552	8	1204	92,0	4,6	106	425	540	0,007	16	105
ДП-92	135	470	670	0,00745	24,4	480	8	1100	113	6,3	150	405	760	0,0043	13	127

Тип	Смешанного возбуждения								Магнит- ный поток полюса Φ полезный, мВб	Номи- нальный ток воз- буждения парал- лельной обмотки $I_{н'}$ А	Макси- мальная допускае- мая частота враще- ния, об/мин	Момент инерции якоря J , кг · м ²	Масса двига- теля Q , кг
	$P_{н'}$ кВт	n , об/мин	$I_{н'}$ А	$r_{пос'}$ Ом	$r_{пар'}$ Ом	Число витков полюса							
						парал- лельной обмотки $w_{пар}$	последова- тельной обмотки $w_{пос}$						
ДП-12	3	1160	17,5	0,135	496	2000	$24 \frac{1}{2}$	4,7	0,36	3300	0,05	125	
ДП-21	4,5	1080	27	0,072	228	1850	$18 \frac{1}{2}$	5,5	0,71	3200	0,125	190	
ДП-22	6	1050	34	0,067	206	1620	$18 \frac{1}{2}$	7,8	0,75	3000	0,155	215	
ДП-31	8,5	860	48	0,029	140	1600	$15 \frac{1}{2}$	8,9	1,12	2600	0,30	295	
ДП-32	12	800	66	0,018	132	1370	$10 \frac{1}{2}$	12,9	1,2	2500	0,425	350	
ДП-41	16	720	87	0,0125	128	1700	9	16,6	1,2	2200	0,80	520	
ДП-42	21	675	112	0,011	118	1460	8	23,8	1,34	2100	1,05	620	
ДП-52	32	760	165	0,006	86,4	1300	7	29,0	1,78	2100	1,87	860	
ДП-62	46	610	235	0,0058	65,6	1250	7	45,5	2,34	1800	4,00	1425	
ДП-72	70	540	355	0,0041	49,2	1224	5	62,5	3,12	1600	8,25	2050	
ДП-82	100	490	500	0,0025	42,8	1100	4	93,0	3,7	1500	17,0	3100	
ДП-92	140	450	700	0,002	42,8	1330	4	116	3,6	1500	32,5	4450	

Быстроходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения										Последовательного возбуждения					
	P_H , кВт	n , об/мин	I_H , А	$r_{я} + r_{д.п.}$, Ом	$r_{пар}$, Ом	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки I_H , А	P_H , кВт	n , об/мин	I_H , А	$r_{пос.}$, Ом	Число витков полюса последовательной обмотки $w_{пос.}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб
ДП-21	5,5	1460	31	0,531	128	690	2	1650	5,8	1,24	5,5	1200	33	0,0275	82	6,7
ДП-22	8	1550	44	0,322	130	522	2	1480	7,4	1,18	8	1200	46	0,19	63	8,9
ДП-31	12	1410	64	0,194	107	492	2	1700	8,8	1,42	12	1100	67	0,118	60	10,5
ДП-32	16	1230	84	0,125	94	372	2	1470	13,2	1,6	17	1000	92	0,06	39	15,5
ДП-41	22	1160	114	0,072	70	310	2	1480	17,0	2,2	23	970	124	0,053	40	19,6
ДП-42	29	1040	150	0,0510	65	246	2	1270	24,5	2,4	32	900	170	0,0255	25	27,2
ДП-52	38	1020	193	0,0315	58	210	2	1320	29,0	2,6	42	850	218	0,022	26	34
ДП-82А	112	650	560	0,0121	34,4	432	8	1204	92	5,4	125	590	630	0,0051	12	100
ДП-82А	140	640	700	0,0121	34,4	432	8	1204	92	5,4	140	575	710	0,0051	12	100

Тип	Смешанного возбуждений								Максимальная допуская частота вращения, об/мин	Момент инерции якоря J , кг·м²	Масса двигателя Q , кг	
	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{\text{пос}}$, Ом	$r_{\text{пар}}$, Ом	Число витков полюса w		Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб				Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки I_n , А
						параллельной обмотки $w_{\text{пар}}$	последовательной обмотки $w_{\text{пос}}$					
ДП-21	5,5	1470	31,5	0,072	228	1850	$18 \frac{1}{2}$	5,7	0,71	3200	0,125	190
ДП-22	8	1400	45	0,067	206	1620	$18 \frac{1}{2}$	7,8	0,78	3000	0,155	215
ДП-31	12	1310	65	0,029	140	1600	$15 \frac{1}{2}$	9,2	1,12	2600	0,30	295
ДП-32	16	1140	85	0,018	132	1370	$10 \frac{1}{2}$	14,3	1,2	2500	0,425	350
ДП-41	23	1120	120	0,0125	128	1700	9	17,6	1,2	2200	0,8	520
ДП-42	32	1000	165	0,011	118	1460	8	25,0	1,34	2100	1,05	620
ДП-52	42	970	214	0,006	86,4	1300	7	30,5	1,78	2100	1,87	860
ДП-82А	115	630	580	0,0025	42,8	1100	4	97	4,2	1500	17,0	3100
ДП-82А	140	600	700	0,0025	42,8	1100	4	97	4,2	1500	17,0	3100

Отличия для двигателя параллельного возбуждения со стабилизирующей обмоткой

Исполнение по частоте вращения	Тип	n_n , об/мин	Число витков на полюс стабилизирующей обмотки $w_{\text{пос}}$	Сопrotивление стабилизирующей обмотки $r_{\text{пос}}$, Ом	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб
Тихоходные	ДП-12	1150	$6 \frac{1}{2}$	0,046	4,7
	ДП-21	1020	$5 \frac{1}{2}$	0,026	5,9
	ДП-22	1090	$4 \frac{1}{2}$	0,019	7,6
	ДП-31	830	$4 \frac{1}{2}$	0,012	9,2
	ДП-32	760	$4 \frac{1}{2}$	0,0086	13,7
	ДП-41	690	3	0,0037	17,5
	ДП-42	640	2	0,002	25,0
	ДП-52	730	2	0,0023	30,0
	ДП-62	610	2	0,004	46,0
	ДП-72	570	$1 \frac{1}{2}$	0,0022	59,0
	ДП-82	480	1	0,00135	96
	ДП-92	460	1	0,0011	116

Исполнение по частоте вращения	Тип	n_n , об/мин	Число витков на полюс стабилизирующей обмотки $w_{\text{пос}}$	Сопротивление стабилизирующей обмотки $r_{\text{пос}}$, Ом	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб
Быстроходные	ДП-21	1420	$5 \frac{1}{2}$	0,026	5,9
	ДП-22	1490	$4 \frac{1}{2}$	0,019	7,7
	ДП-31	1350	$4 \frac{1}{2}$	0,012	9,2
	ДП-32	1180	$4 \frac{1}{2}$	0,0086	13,7
	ДП-41	1100	3	0,0037	18,0
	ДП-42	1020	2	0,002	25,0
	ДП-52	980	2	0,0023	30,5
	ДП-82А	630	1	0,00135	96
	ДП-82А	610	1	0,00135	96

Примечания: 1. Добавочные сведения, приведенные в примечаниях 1—7 приложения для двигателей типа МП, относятся также и к двигателям типа ДП.

2. Двигатели типа ДП-82А имеют разные данные для двух исполнений: для закрытого (предпоследняя строка) и для защищенного, продуваемого (последняя строка).

3. Двигатели ДП-12—ДП-42 изготавливаются с неразъемными станинами; ДП-52 — как с разъемными, так и с неразъемными; ДП-62—ДП-92 — только с разъемными станинами.

4. Данные якоря, приведенные для двигателя параллельного возбуждения, являются общими и для двигателей последовательного и смешанного возбуждения.

Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа Д, 220 В закрытые с естественным охлаждением, режим 60 мин и ПВ=40%; защищенные с независимой вентиляцией (продуваемые), продолжительный номинальный режим ПВ=100%

Тихоходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения														
	Без стабилизирующей обмотки													Отличия двигателя со стабилизирующей обмоткой	
	Режим 60 мин и ПВ=100%			Режим ПВ=40%			Ом $r_{я} + r_{д.п.}$	Ом $r_{пар.}$	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Ф полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки $I_{н. А}$	Режим 60 мин и ПВ=100%	Режим ПВ=40%
	$P_{н.}$ кВт	$n_{н.}$ об/мин	$I_{н.}$ А	$P_{н.}$ кВт	$n_{н.}$ об/мин	$I_{н.}$ А								$n_{н.}$ об/мин	$n_{н.}$ об/мин
Д-12	2,5	1180	14,6	2,4	1230	14	1,63	260	990	2	1800	4,6	0,65	1140	1200
Д-21	4,5	1030	26	3,6	1080	20,5	0,95	128	920	2	1650	5,8	1,24	1000	1060
Д-22	6,0	1100	33	4,8	1150	26	0,57	130	696	2	1480	7,4	1,18	1070	1120
Д-31	8,0	840	44	6,8	880	37	0,42	107	738	2	1700	8,8	1,42	820	850
Д-32	12,0	770	65	9,5	800	51	0,28	94	558	2	1470	13,2	1,6	740	770
Д-41	16,0	690	86	13,0	720	69,5	0,17	70	492	2	1480	17,0	2,2	670	700
Д-806	22,0	650	116	16,0	710	84	0,1085	65	372	2	1400	25,0	2,7	635	700
Д-808	37,0	575	192	22,0	630	112	0,054	44,4	278	2	1250	38,0	3,93	565	620
Д-810	55,0	550	282	29,0	600	148	0,0356	46,2	234	2	1500	47,5	3,85	540	590
Д-812	75,0	515	380	38,0	565	192	0,0230	34,4	210	2	1350	57,2	5,10	505	555
Д-814	110,0	500	550	55,0	560	280	0,0805	35,2	608	8	1200	82,1	6,25	490	550
Д-816	150,0	480	745	70,0	535	350	0,084	24,7	504	8	1160	104	7,44	470	525
Д-818	185,0	450	920	83,0	470	415	0,0066	17,3	504	8	1000	111	10,20	440	460

Тип	Параллельного возбуждения			Последовательного возбуждения									Максимальная допускае- мая частота вращения, об/мин	Момент инерции якоря J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
	Отличия двигателя со стабилизирующей обмоткой														
	Число витков на полюс стабили- зирующей обмотки $w_{\text{пос}}$	Сопротивление стабилизирую- щей обмотки $r_{\text{пос}}$, Ом	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Режим 60 мин и ПВ=100%			Режим ПВ=40%			$r_{\text{пос}}$, Ом	Число витков полюса последо- вательной обмотки $w_{\text{пос}}$	Магнитный по- ток полюса Φ полезный, мВб			
				$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$I_{\text{н}}$, А	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$I_{\text{н}}$, А						
Д-12	6 $\frac{1}{2}$	0,042	4,7	2,5	1100	16	2,4	1150	15	0,59	83	5,2	3600	0,05	130
Д-21	5 $\frac{1}{2}$	0,026	5,9	4,5	900	28	3,6	1040	22	0,275	82	6,25	3600	0,125	200
Д-22	4 $\frac{1}{2}$	0,019	7,6	6,0	850	36,5	4,8	970	28	0,3	82	8,9	3600	0,155	225
Д-31	4 $\frac{1}{2}$	0,012	9,2	8,0	800	46,5	6,8	900	38,5	0,118	60	9,6	3600	0,3	310
Д-32	4 $\frac{1}{2}$	0,0086	13,7	12,0	675	69	9,5	760	53	0,097	48	14,7	3300	0,425	365
Д-41	3	0,0037	17,5	16,0	650	89	13,0	730	71	0,053	40	18,4	3000	0,8	540
Д-806	2	0,0046	25,5	22,0	575	120	17,0	640	92	0,052	36	27,0	2600	1,0	635
Д-808	2	0,0037	38,7	37,0	525	200	24,0	615	125	0,031	30	39,6	2300	2,0	885
Д-810	2	0,0041	48,4	55,0	500	294	35,0	610	182	0,0171	26	50,3	2200	3,625	1250
Д-812	1 $\frac{1}{2}$	0,0027	58,3	75,0	475	390	47,0	560	242	0,0103	21	60,2	1900	7,0	1770
Д-814	1	0,002	83,7	110,0	460	565	70,0	550	356	0,0069	16	86,9	1700	10,25	2240
Д-816	1	0,0011	106,2	150,0	450	765	85,0	540	430	0,0052	14	107,5	1600	16,25	2860
Д-818	1	0,001	113,2	185,0	410	935	100	510	500	0,0039	14	119	1500	27,5	3745

Быстроходное исполнение

Тип	Параллельного возбуждения														Отличия двигателя со стабилизирующей обмоткой	
	Без стабилизирующей обмотки															
	Режим 60 мин и ПВ=100%			Режим ПВ=40%			$r_{\text{я}} + r_{\text{д.п.}}, \text{ Ом}$	$r_{\text{пар}}, \text{ Ом}$	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $w_{\text{пар}}$	Магнитный поток полюса Ф полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки $I_{\text{н}}, \text{ А}$	Режим 60 мин и ПВ=100%	Режим ПВ=40%	
	$P_{\text{н}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$	$P_{\text{н}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$								$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	
Д-21	5,5	1440	31	4,4	1500	24,5	0,531	128	690	2	1650	5,8	1,24	1400	1460	
Д-22	8,0	1510	43,5	6,5	1570	34	0,322	130	522	2	1480	7,4	1,18	1450	1510	
Д-31	12,0	1360	64	9,5	1420	50,5	0,194	107	492	2	1700	8,8	1,42	1310	1360	
Д-32	18,0	1190	94	13,0	1240	68	0,125	94	372	2	1470	13,2	1,6	1140	1190	
Д-41	24,0	1100	124	17,5	1160	90,5	0,072	70	310	2	1480	17,0	2,2	1060	1120	
Д-806	32,0	1000	165	21,0	1060	110	0,047	65	246	2	1400	25,0	2,7	980	1050	
Д-808	47,0	800	238	26,0	825	134	0,0295	44,4	210	2	1250	37,2	3,93	770	810	

Тип	Параллельного возбуждения			Последовательного возбуждения									Максимально допускаемая частота вращения, об/мин	Момент инерции якоря J, кг·м ²	Масса двигателя Q, кг
	Отличия двигателя со стабилизирующей обмоткой			Режим 60 мин и ПВ=100%			Режим ПВ=40%			r _{пос} , Ом	Число витков полюса последовательной обмотки $\omega_{\text{пос}}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб			
	Число витков на полюс стабилизирующей обмотки $\omega_{\text{пос}}$	Сопротивление стабилизирующей обмотки r _{пос} , Ом	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	P _н , кВт	n _н , об/мин	I _н , А	P _н , кВт	n _н , об/мин	I _н , А						
Д-21	5 $\frac{1}{2}$	0,026	5,9	5,5	1200	33	4,4	1340	26	0,0275	82	6,7	3200	0,125	190
Д-22	4 $\frac{1}{2}$	0,019	7,7	8,0	1200	46	6,5	1300	37	0,19	63	8,9	3000	0,155	215
Д-31	4 $\frac{1}{2}$	0,012	9,2	12,0	1100	68	9,5	1190	52,5	0,118	60	10,5	2600	0,30	295
Д-32	4 $\frac{1}{2}$	0,0086	13,7	18,0	960	98	13,5	1100	72	0,06	39	15,5	2500	0,425	350
Д-41	3	0,0037	18	24,0	970	130	18,0	1060	96	0,053	40	19,6	2200	0,80	520
Д-806	2	0,0046	25,7	32,0	900	170	23,0	1010	120	0,028	26	27,0	2600	1,0	635
Д-808	2	0,0037	37,3	47,0	720	248	30,0	850	155	0,02	24	39,6	2300	2,0	885

Краново-металлургические двигатели постоянного тока типа Д, 440 В закрытые с естественным охлаждением

Тип	Параллельного возбуждения												Отличия двигателя со стабилизирующей обмоткой			
	Без стабилизирующей обмотки															
	Режим 60 мин и ПВ=100%			Режим ПВ=40%			$r_{\text{я}} + r_{\text{д.п.}}, \text{ Ом}$	$r_{\text{пар}}, \text{ Ом}$	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $w_{\text{пар}}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки $I_{\text{н}}, \text{ А}$	Режим 60 мин и ПВ=100%	Режим ПВ=40%	Число витков на полюс стабилизирующей обмотки $w_{\text{пос}}$
	$P_{\text{н}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$	$P_{\text{н}}, \text{ кВт}$	$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$								$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	$n_{\text{н}}, \text{ об/мин}$	

Тихоходное исполнение

Д-21	4,0	1220	12	3,1	1300	9,5	3,54	128	1610	2	1650	5,6	1,24	1200	1280	5 $\frac{1}{2}$
Д-31	6,7	875	19	5,2	910	14,5	2,08	107	1476	2	1700	8,8	1,42	860	890	4 $\frac{1}{2}$
Д-41	15,0	710	40	12,5	720	34	0,695	70	984	2	1480	17,0	2,2	695	710	3
Д-808	37,0	575	96	22,0	630	56	0,210	44,4	556	2	1250	38,6	3,93	565	620	2
Д-810	55,0	560	141	29,0	600	74	0,146	46,2	468	2	1500	46,8	3,85	550	590	4
Д-812	70,0	520	176	36,0	570	92	0,099	34,4	418	2	1350	57,3	5,10	510	560	3
Д-816	150,0	490	370	70,0	540	175	0,0324	24,7	1008	8	1160	102,5	7,44	480	530	2
Д-818	185,0	450	460	83,0	470	205	0,026	17,3	1008	8	1000	111,5	10,20	440	460	2

Быстроходное исполнение

Д-22	7,0	1410	19,5	5,6	1550	15,5	1,69	42	1044	2	1145	45,0	3,6	1420	1510	4
Д-32	17,0	1190	45	12,0	1240	31,5	0,534	36	738	2	1140	57,0	4,3	1150	1200	3
Д-806	32,0	1000	82	21,0	1060	55	0,205	65	492	2	1400	25,0	2,7	980	1050	2

Тип	Параллельного возбуждения		Последовательного возбуждения										Максимальная до- пускаемая частота враще- ния, об/мин	Момент инерции якоря J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
	Отличия двигателя со стаби- лизирующей обмоткой														
	Сопротивле- ние стабили- зирующей обмотки $r_{\text{пос}}$, Ом	Магнитный поток полюса Ф полезный, мВб	Режим 60 мин и ПВ=100%			Режим ПВ=40%			$r_{\text{пос}}$, Ом	Число витков полюса по- следователь- ной обмотки	Магнитный поток полюса Ф полезный, мВб				
$P_{\text{н'}}$, кВт			$n_{\text{н'}}$, об/мин	$I_{\text{н'}}$, А	$P_{\text{н'}}$, кВт	$n_{\text{н'}}$, об/мин	$I_{\text{н'}}$, А								

Тихоходное исполнение

Д-21	0,026	5,7	4,0	1050	13	3,1	1230	10	1,52	188	6,25	3600	0,125	200
Д-31	0,012	9	6,7	800	19,5	5,2	900	16	0,63	142	9,6	3600	0,3	310
Д-41	0,0037	17,5	15,0	660	43	12,5	760	34,5	0,24	76	17,6	3000	0,8	540
Д-808	0,0037	39,4	37,0	525	100	24,0	615	63	0,135	60	40,3	2300	2,0	885
Д-810	0,0013	47,7	55,0	510	145	35,0	610	91	0,066	50	49,6	2200	3,625	1250
Д-812	0,0011	58,4	70,0	500	180	45,0	590	115	0,041	40	58,1	1900	7,0	1770
Д-816	0,0032	104,5	150,0	460	380	85,0	540	215	0,02	26	106	1600	16,25	2860
Д-818	0,0025	113,7	185,0	410	467	106	500	265	0,0148	28	119,5	1500	27,5	3745

Быстроходное исполнение

Д-22	0,017	46	7,0	1180	20,5	5,6	1300	16,5	0,96	140	8,9	3200	0,125	190
Д-32	0,011	59	17,0	970	47	12,6	1200	34	0,24	75	15,5	2500	0,425	350
Д-806	0,0046	25,8	32,0	900	85	23,0	1010	60	0,099	50	27,0	2600	1,0	635

Примечания: 1. Все двигатели четырехполюсные, т. е. $2p=4$. Обмотки полюсов соединены последовательно.

2. Сопротивления даны при 20°C.

3. Таблица составлена по материалам завода 1975 г.

4. Данные якоря, приведенные для двигателя параллельного возбуждения, являются общими и для двигателей последовательного возбуждения.

5. Катушки параллельной обмотки двигателей параллельного возбуждения соединены последовательно.

6. Параллельные обмотки двигателей параллельного возбуждения рассчитаны на длительное включение (ПВ=100%) при номинальном токе.

7. Двигатели параллельного возбуждения допускают повышение частоты вращения в пределах 1:2 ослаблением потока.

8. Двигатели параллельного возбуждения допускают повышение частоты вращения в пределах 1:2 повышением напряжения.

При этом максимальный вращающий момент при полном возбуждении не должен превышать 1,5-кратного номинальному моменту.

**Двигатели постоянного тока продолжительного режима типа П, 220 В защищенные, параллельного возбуждения
с регулированием частоты вращения 1 : 2**

Тип	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{я} +$ $+r_{д.п.}$ Ом	$r_{пар}$, Ом	Число актив- ных про- водни- ков якоря N	Число парал- лельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса парал- лельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номиналь- ный ток возбужде- ния парал- лельной обмотки I_n , А	Макси- мальная допускае- мая ча- стота вращения, об/мин	Момент инер- ции якоря J , кг·м²	Масса двигате- ля Q , кг
П1	0,13	1000	1,0	—	—	—	2	—				0,0125	18,5
	0,3	1500	2,1	22,6	670	3304	2	4000	1,9	0,27	2000		
	0,7	3000	4,3	5,3	670	1708	2	4000	2,2	0,27	3000 3450		
П2	0,2	1000	1,4	26,8	785	3360	2	4000	3,1	0,23	2000	0,015	23,5
	0,45	1500	2,9	11,76	785	2352	2	4000	3,0	0,23	3000		
	1,0	3000	6,0	3,29	785	1288	2	4000	3,0	0,23	3450		
П21	0,2	750	1,35				2				1500	0,042	38,0
	0,3	1000	2,0	16,6	740	3384	2	5300	3,1	0,24	2000		
	0,7	1500	4,3	6,75	600	2376	2	4800	3,1	0,30	3000		
	1,5	3000	9,0	1,99	600	1224	2	4800	3,2	0,30	3450		
П22	0,3	750	1,95	14,3	712	3240	2	4800	4,5	0,25	1500	0,052	44,0
	0,45	1000	2,75	9,65	712	2484	2	4800	4,5	0,25	2000		
	1,0	1500	5,9	4,17	712	1728	2	4800	4,3	0,25	3000		
	2,2	3000	12,5	1,03	712	864	2	4800	4,7	0,25	3000		

Тип	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{я} + r_{д.п.}$, Ом	$r_{пар}$, Ом	Число активных проводников якоря N	Число параллельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса параллельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номинальный ток возбуждения параллельной обмотки I_n , А	Максимальная допускаемая частота вращения, об/мин	Момент инерции якоря J , кг·м²	Масса двигателя Q , кг
П31	0,45	750	2,9	9,48	605	2844	2	5000	5,2	0,29	1500	0,09	54,5
	0,7	1000	4,25	5,45	470	2160	2	4600	5,3	0,38	2000		
	1,5	1500	8,7	2,455	470	1512	2	4600	5,1	0,38	3000		
	3,2	3000	17,5	0,642	285	720	2	3600	5,7	0,62	3000		
П32	0,7	750	4,2	4,98	564	1908	2	4600	8,1	0,31	1500	0,116	67,5
	1,0	1000	5,7	3,17	358	1440	2	3600	4,3	0,49	2000		
	2,2	1500	12,0	1,205	358	936	2	3600	8,6	0,49	3000		
	4,5	3000	24,3	0,352	270	504	2	3600	8,2	0,65	3000		
П41	1,0	750	6,8	5,35	280	1890	2	2100	3,6	0,60	1500	0,15	75
	1,5	1000	9,3	2,9	280	1458	2	2100	3,8	0,60	2000		
	3,2	1500	18,4	1,032	198	972	2	1750	4,0	0,84	3000		
	6,0	3000	33,0	0,36	280	540	2	2100	3,7	0,60	3000		
П42	1,5	750	9,75	2,92	242	1404	2	1800	5,1	0,69	1500	0,18	80
	2,2	1000	13,3	1,75	243	1080	2	1800	5,2	0,69	2000		
	4,5	1500	25,4	0,78	228	756	2	1350	5,1	0,73	3000		
П51	2,2	750	13,6	1,91	168	1364	2	1600	5,4	0,99	1500	0,35	114
	3,2	1000	18,3	1,051	168	1054	2	1600	5,5	0,99	2000		
	6,0	1500	33,2	0,472	132	682	2	1500	5,8	1,27	3000		

Тип	$P_{н'}$ кВт	n , об/мин	$I_{н'}$ А	$r_{я} +$ $r_{л. п'}$ Ом	$r_{пар'}$ Ом	Число актив- ных про- водни- ков якоря N	Число парал- лельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса парал- лельной обмотки $\omega_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номиналь- ный ток возбужде- ния парал- лельной обмотки $I_{н'}$ А	Макси- мальная допускае- мая час- тота вращения, об/мин	Момент инер- ции якоря J , кг·м ²	Масса двигате- ля Q , кг
П52	3,2	750	19,0	1,073	184	992	2	1650	7,7	0,91	1500	0,40	124
	4,5	1000	25,2	0,632	184	744	2	1650	7,9	0,91	2000		
	8,0	1500	43,5	0,269	150	496	2	1500	8,2	1,11	3000		
П61	4,5	750	26,0	0,76	216	992	2	2200	7,7	0,77	1500	0,56	131
	6,0	1000	32,6	0,494	158	744	2	1950	7,9	1,05	2000		
	11,0	1500	59,5	0,187	133	496	2	1800	8,2	1,25	2250		
П62	6,0	750	33,5	0,531	154	744	2	1800	10,5	1,08	1500	0,65	187
	8,0	1000	43,0	0,328	136	558	2	1700	10,7	1,23	2000		
	14,0	1500	73,5	0,1275	116	370	2	1600	11,1	1,44	2250		
П71	7,0	750	42,0	0,546	106	810	2	1500	9,2	1,49	1500	1,4	290
	10,0	1000	63,0	0,300	85	594	2	1400	9,7	1,85	2000		
	19,0	1500	103,0	0,1235	76,8	396	2	1250	10,1	2,04	2250		
П72	10,0	750	58,0	0,357	92,5	594	2	1300	12,7	1,69	1500	1,6	330
	12,5	1000	78,0	0,237	108	540	2	1450	10,7	1,46	2000		
	25,0	1500	132,0	0,0828	67,0	324	2	1100	12,5	2,34	2250		

Тип	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{я} +$ $r_{д. п.}$ Ом	$r_{пар}$, Ом	Число актив- ных про- водни- ков якоря N	Число парал- лельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса парал- лельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номиналь- ный ток возбужде- ния парал- лельной обмотки I_n , А	Максимальная допускае- мая частота вращения, об/мин	Момент инерции якоря J , кг·м²	Масса двигателя Q , кг
П81	14,0	750	79,0	0,244	92	580	2	1550	13,2	1,71	1500	2,7	385
	19,0	1000	105,0	0,144	96,2	444	2	1600	13,3	1,64	2000		
	32,0	1500	166,0	0,075	95,5	324	2	1600	12,4	1,64	2250		
П82	19,0	750	93,0	0,143	40,4	420	2	936	19,2	3,89	1500	3,1	435
	25,0	1000	133,0	0,081	40,4	324	2	936	18,8	3,89	2000		
	42,0	1500	218,0	0,0462	40,4	234	2	936	17,4	3,89	2250		
П91	19,0	600	106	0,198	44	580	2	1000	16,3	3,57	1200	5,9	605
	25,0	750	136	0,102	44	420	2	1000	18,9	3,57	1500		
	32,0	1000	171	0,0666	35,8	330	2	870	18,4	4,39	2000		
	55,0	1500	287	0,0257	35,8	210	2	870	19,8	4,39	2250		
П92	25,0	600	136	0,111	48,4	420	2	1000	23,4	3,25	1200	7,0	705
	32,0	750	169	0,004	31,8	324	2	830	26,8	4,94	1500		
	42,0	1000	219	0,0547	48,4	290	2	1000	20,8	3,25	2000		
	75,0	1500	381	0,0138	31,8	162	2	830	20,1	4,94	1900		
П101	32,0	600	172	0,0749	37,8	372	2	950	26,9	4,16	1200	10,3	865
	42,0	750	222	0,049	37,8	282	2	950	29,7	4,16	1500		
	55,0	1000	286	0,0292	37,8	222	2	950	27,9	4,16	1500		
	100,0	1500	508	0,0131	37,8	304	2	950	13,7	4,16	1800		

Тип	P_n , кВт	n , об/мин	I_n , А	$r_{я} + r_{д. п.}$, Ом	$r_{пар}$, Ом	Число актив- ных про- водни- ков якоря N	Число парал- лельных ветвей якоря $2a$	Число витков полюса парал- лельной обмотки $w_{пар}$	Магнитный поток полюса Φ полезный, мВб	Номиналь- ный ток возбужде- ния парал- лельной обмотки I_n , А	Макси- мальная допускае- мая ча- стота вращения, об/мин	Момент инер- ции якоря J , кг·м ²	Масса двигате- ля, Q , кг
П102	42,0	600	223	0,0225	32,5	282	2	840	37,4	4,84	1200	12,0	985
	55,0	750	286	0,0311	32,5	222	2	840	37,0	4,84	1500		
	75,0	1000	385	0,0199	32,5	186	2	840	33,4	4,84	1500		
	125,0	1500	632	0,079	32,5	228	2	840	13,0	4,84	1800		
П111	55,0	600	287	0,0362	28	246	2	850	41,4	5,61	1200	20,4	1180
	75,0	750	387	0,0236	28	210	2	850	39,1	5,61	1500		
	100,0	1000	511	0,0153	28	334	2	850	18,6	5,61	1500		
	160,0	1500	809	0,0638	28	216	2	850	13,5	5,61	1800		
П112	70,0	600	361	0,0262	24	210	2	750	48,8	6,55	1200	23,0	1370
	85,0	750	436	0,0192	24	336	2	750	24,6	6,55	1500		
	125,0	1000	632	0,0102	24	252	2	750	24,9	6,55	1500		
	200,0	1500	1000	0,0495	24	184	2	750	16,2	6,55	1500		

Примечания: 1. В таблице приведены технические данные наиболее распространенных двигателей общепромышленного исполнения на напряжение 220 В параллельного возбуждения.

2. Двигатели П11—П32 двухполюсные ($2p=2$), а П41—П112 четырехполюсные ($2p=4$). Обмотки полюсов соединены последовательно.

3. Сопротивления даны при 20°C.

Краново-металлургические двигатели асинхронные с фазным ротором типа МТ, 380 В, ПВ=25%

Тип	$P_{н'}$ кВт	$n_{н'}$ об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{с, н'}$, А	$I_{с, х'}$, А	r_c , Ом	x_c , Ом	$E_{р, н'}$, В	$I_{р, н'}$, А	r_p , Ом	x_p , Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e		
				номинальный	холостого хода											
МТ-11-6	2,2	885	2,3	0,72	0,39	7,2	5,2	3,67	2,47	135	12,8	0,61	0,506	2,65	0,0425	90
МТ-12-6	3,5	910	2,5	0,73	0,35	10,3	7,5	2,09	1,565	204	12,2	0,77	0,73	1,76	0,0675	109
МТ-21-6	5	940	2,9	0,68	0,32	14,9	10,9	1,41	1,07	164	20,6	0,24	0,406	2,2	0,1025	145
МТ-22-6	7,5	945	2,8	0,69	0,27	20,9	15,0	0,685	0,735	227	21,6	0,29	0,544	1,59	0,142	163
МТ-31-6	11	953	3,1	0,71	0,24	28,4	19,2	0,415	0,465	200	35,4	0,132	0,27	1,84	0,262	218
МТ-31-8	7,5	702	2,6	0,69	0,22	21,2	16,7	0,788	0,898	185	28,0	0,211	0,33	1,94	0,262	218
МТ-41-8	11	715	2,9	0,67	0,22	30,8	22,2	0,43	0,515	155	46,7	0,0835	0,171	2,33	0,465	300
МТ-42-8	16	718	3,0	0,69	0,22	42,5	29,6	0,271	0,354	222	46,3	0,105	0,239	1,63	0,675	365
МТ-51-8	22	723	3,0	0,70	0,23	56,5	36,1	0,179	0,297	197	70,5	0,0496	0,136	1,84	1,1	435
МТ-52-8	30	725	3,0	0,74	0,23	71,6	44,0	0,186	0,225	257	74,3	0,0593	0,174	1,41	1,42	510
МТ-61-10	30	574	3,3	0,67	0,20	80,0	55,0	0,1125	0,273	142	133	0,0225	0,0382	2,47	3,25	785
МТ-62-10	45	577	3,2	0,71	0,18	110	71,0	0,0652	0,186	206	138	0,0280	0,0547	1,73	4,37	945
МТ-63-10	60	577	2,9	0,77	0,16	133	73,8	0,0549	0,160	253	160	0,0332	0,0704	1,42	5,5	1100
МТ-71-10	80	582	3,3	0,71	0,23	190	119	0,0275	0,113	294	167	0,0266	0,068	1,21	10	1500
МТ-72-10	100	584	3,3	0,71	0,19	239	149	0,0199	0,0877	368	170	0,0299	0,0817	0,97	12	1650
МТ-73-10	125	585	3,4	0,73	0,18	286	170	0,0151	0,0731	442	175	0,0337	0,098	0,808	14,2	1850

Примечания: 1. Все двигатели имеют схему соединения фаз статора 380/220 В, Δ/Δ ; ротора — Δ .

2. Активные сопротивления даны при 75°C.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1954 г.

**Крановые асинхронные двигатели с фазным ротором типов МТ и МТВ, 380 В, 50 Гц, ПВ=25%
(изоляция классов Е, В)**

Тип	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$\frac{M_{\text{м}}}{M_{\text{н}}}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{\text{с.н}}$, А	$I_{\text{с.х}}$, А	$r_{\text{с}}$, Ом	$x_{\text{с}}$, Ом	$E_{\text{р.н}}$, В	$I_{\text{р.н}}$, А	$r_{\text{р}}$, Ом	$x_{\text{р}}$, Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^2$)		
				номинальный	холостого хода											
MT011-6 MT012-6	1,4 2,2	885 895	2,3 2,3	0,65 0,67	0,15 0,13	5,3 7,5	3,9 5,4	5,98 3,6	3,93 2,58	112 144	9,3 11,0	0,695 0,67	0,57 0,585	3,14 2,5	0,0212 0,0288	51 58
MT111-6 MT112-6	3,5 5,0	915 925	2,3 2,5	0,70 0,69	0,11 0,12	10,5 14,8	6,6 9,5	2,16 1,32	2,03 1,39	181 206	13,7 16,6	0,525 0,50	0,755 0,43	1,96 1,72	0,0488 0,0675	76 88
MT211-6	7,5	935	2,5	0,70	0,09	20,8	11,8	0,68	1,07	255	19,8	0,44	0,88	1,38	0,115	120
MTB311-6 MTB311-8 MTB312-6 MTB312-8	11,0 7,5 16 11	945 695 955 710	2,8 2,5 2,8 2,8	0,73 0,71 0,77 0,66	0,09 0,09 0,08 0,10	28,6 21,0 37,6 33,0	16,7 14,0 20,6 22,1	0,54 0,88 0,33 0,53	0,575 0,965 0,41 0,56	172 251 208 182	42,5 20,5 49,5 41,0	0,11 0,47 0,099 0,13	0,225 0,72 0,25 0,23	2,1 1,41 1,75 1,96	0,225 0,275 0,313 0,387	170 170 210 210
MTB411-6 MTB411-8 MTB412-6 MTB412-8	22 16 30 22	965 715 970 720	2,8 2,8 2,8 2,8	0,71 0,65 0,73 0,69	0,07 0,08 0,06 0,07	55,0 45,7 70,5 58,0	33,2 30,2 42,0 37,1	0,19 0,285 0,125 0,207	0,31 0,43 0,23 0,32	225 207 259 234	61,0 49,5 72,0 59,0	0,066 0,103 0,055 0,09	0,23 0,25 0,225 0,24	1,6 1,73 1,4 1,53	0,5 0,538 0,675 0,75	280 280 345 345

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{c.H.}$, А	$I_{c.x.}$, А	r_c , Ом	x_c , Ом	$E_{p.H.}$, В	$I_{p.H.}$, А	r_p , Ом	x_p , Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^0$)		
				номинальный	холостого хода											
МТВ511-8	30	720	2,8	0,68	0,06	77,0	46	0,123	0,245	280	67,5	0,082	0,28	1,28	1,025	410
МТВ512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17	322	76,5	0,072	0,24	1,12	1,4	500
МТВ611-10	45	575	3,0	0,70	0,066	115	80	0,087	0,189	185	155	0,027	0,046	1,93	4,25	860
МТВ612-10	60	578	3,0	0,72	0,061	145	93	0,055	0,142	245	153	0,033	0,062	1,44	5,25	1020
МТВ613-10	80	580	3,0	0,72	0,056	190	120	0,042	0,107	320	155	0,038	0,078	1,12	6,25	1180
МТВ711-10	100	584	2,8	0,67	0,053	255	180	0,025	0,096	275	230	0,017	0,066	1,28	10,25	1550
МТВ712-10	125	587	2,8	0,66	0,045	320	230	0,016	0,080	345	225	0,020	0,082	1,01	12,7	1700
МТВ713-10	160	587	2,8	0,68	0,04	395	285	0,012	0,061	420	235	0,022	0,098	0,84	15,0	1900

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1964 г.

Металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типа МТМ, 380 В, 50 Гц, ПВ=40%
(изоляция классов F, H)

Тип	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{с.н}$, А	$I_{с.х}$, А	r_c , Ом	x_c , Ом	$E_{р.н}$, В	$I_{р.н}$, А	r_p , Ом	x_p , Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^2$)		
				номинальный	холостого хода											
МТМ111-6	2,2	885	2,3	0,76	0,13	6,6	4,6	4,33	2,61	144	11,1	0,72	0,595	2,5	0,0487	76
МТМ112-6	3,5	895	2,3	0,75	0,13	9,5	7,25	2,8	1,67	177	13,5	0,725	0,595	2,02	0,0675	88
МТМ211-6	5,0	920	2,5	0,75	0,10	13,6	9,7	1,41	1,29	215	16,2	0,58	0,66	1,76	0,115	120
МТМ311-6	7,5	945	2,5	0,73	0,095	20,0	14,2	0,90	0,663	240	19,7	0,35	0,511	1,51	0,225	170
МТМ311-8	5,0	685	2,5	0,73	0,12	14,7	10,2	1,76	1,24	215	17,0	0,517	0,664	1,67	0,275	170
МТМ312-6	11,0	950	2,8	0,76	0,09	27,3	17,8	0,595	0,485	166	43,0	0,097	0,181	2,2	0,312	210
МТМ312-8	7,5	695	2,5	0,74	0,105	20,6	13,9	1,04	0,833	254	20,0	0,0462	0,641	1,41	0,387	210
МТМ411-6	16	957	2,8	0,78	0,075	38,0	21,4	0,323	0,398	200	53,0	0,092	0,235	1,8	0,5	280
МТМ411-8	11	710	2,8	0,70	0,085	30,0	21	0,465	0,543	172	41,5	0,116	0,214	2,1	0,537	280
МТМ412-6	22	960	2,8	0,80	0,07	48,5	24,2	0,218	0,312	225	63,0	0,072	0,225	1,63	0,675	345
МТМ412-8	16	715	2,8	0,70	0,08	42,5	30	0,316	0,371	200	52,0	0,098	0,195	1,82	0,75	345

Тип	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{c, H}$, А	$I_{c, X}$, А	r_c , Ом	x_c , Ом	$E_{p, H}$, В	$I_{p, H}$, А	r_p , Ом	x_p , Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^3$)		
				номинальный	холостого хода											
МТМ511-8	22	715	2,8	0,73	0,07	55,0	37	0,205	0,284	237	58,5	0,106	0,231	1,53	1,025	410
МТМ512-8	30	716	2,8	0,73	0,07	72,0	46	0,141	0,214	288	65,0	0,102	0,252	1,26	1,4	500
МТМ611-10	38	577	3,0	0,75	0,07	90,0	57	0,119	0,222	172	138	0,0255	0,0463	2,085	4,25	860
МТМ612-10	50	577	2,8	0,77	0,06	114,0	66	0,088	0,176	223	140	0,0313	0,0625	1,5	5,25	1020
МТМ613-10	63	580	2,9	0,74	0,06	140	80	0,061	0,140	282	139	0,0366	0,078	1,28	6,25	1180
МТМ711-10	80	585	2,7	0,73	0,05	188	115	0,033	0,122	246	200	0,0159	0,067	1,45	10,25	1550
МТМ712-10	100	587	2,8	0,70	0,05	240	150	0,022	0,094	316	196	0,018	0,082	1,13	12,75	1700
МТМ713-10	125	587	2,9	0,75	0,04	275	156	0,0183	0,081	372	196	0,020	0,098	0,302	15,0	1900

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1964 г.

Краново-металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типа МТН, 380/220 В, 50 Гц, ПВ=25%

Тип	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$\frac{M_{\text{м}}}{M_{\text{н}}}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{\text{с. н}}$, А	$I_{\text{с. х}}$, А	$r_{\text{с}}$, Ом	$x_{\text{с}}$, Ом	$E_{\text{р. н}}$, В	$I_{\text{р. н}}$, А	$r_{\text{р}}$, Ом	$x_{\text{р}}$, Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^2$)		
				номинальный	холостого хода											
МТН111-6	3,5	870	1,2	0,72	0,154	11,6	9,87	2,62	1,7	178	16,5	0,671	0,565	4,54	0,195	76
МТН112-6	5,3	885	2,0	0,76	0,123	15,3	11,8	1,61	1,14	217	19	0,603	0,625	3,1	0,27	88
МТН211-6	8,2	900	2,0	0,7	0,112	24,6	19	0,835	0,88	257	23	0,466	0,666	2,18	0,46	120
МТН311-6	13	925	2,5	0,74	0,095	35	23,2	0,51	0,645	186	51	0,124	0,241	4,2	0,9	170
МТН312-6	17,5	945	2,4	0,77	0,0916	43	34,4	0,337	0,431	233	54	0,125	0,254	2,66	1,25	210
МТН311-8	9	675	2,0	0,74	0,12	26,1	17,7	0,98	0,843	264	26	0,498	0,643	2,07	1,1	170
МТН312-8	13	690	2,5	0,74	0,106	34,7	27,5	0,534	0,529	178	53	0,13	0,1825	4,54	1,25	210
МТН411-6	27	950	3,0	0,77	0,08	65	39,7	0,219	0,271	247	77	0,08	0,233	2,37	2,0	280
МТН412-6	36	955	3,1	0,75	0,071	87	51,8	0,133	0,197	271	88	0,059	0,173	1,96	2,7	345
МТН411-8	18	695	2,5	0,73	0,086	48	29,8	0,352	0,507	221	59	0,125	0,245	2,96	2,15	280
МТН412-8	26	710	2,5	0,68	0,084	72	49,6	0,202	0,313	266	68	0,102	0,231	2,03	3,0	345

Тип	P_H , кВт	n_H , об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{c, H}$, А	$I_{c, X}$, А	r_c , Ом	x_c , Ом	$E_{p, H}$, В	$I_{p, H}$, А	r_p , Ом	x_p , Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^2$)		
				номн-наль-ный	холо-стого хода											
МТН511-8	34	695	2,3	0,77	0,07	82	47,4	0,164	0,232	297	81	0,124	0,448	1,645	4,3	470
МТН512-8	45	695	3,0	0,79	0,08	104	53,1	0,103	0,172	319	94	0,091	0,356	1,415	5,7	570
МТН611-10	53	560	3,2	0,76	0,08	128	78,1	0,0855	0,18	197	185	0,0274	0,176	3,72	17	900
МТН612-10	70	560	2,6	0,77	0,06	165	88,7	0,06	0,136	262	181	0,033	0,133	2,1	21	1070
МТН613-10	90	570	2,1	0,76	0,06	207	120	0,0416	0,102	339	179	0,0384	0,0988	1,26	25	1240
МТН711-10	125	580	2,3	0,74	0,042	287	155	0,0255	0,078	288	294	0,017	0,077	1,74	41	1550
МТН712-10	155	580	2,3	0,75	0,044	355	183	0,0202	0,064	345	295	0,0189	0,091	1,21	51	1700
МТН713-10	200	582	2,3	0,73	0,042	458	247	0,0135	0,048	431	305	0,021	0,109	0,78	60	1900

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1975 г.

Краново-металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором типа МТФ, 380/220 В, 50 Гц, ПВ=25%

Тип	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\frac{M_m}{M_n}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
				$\cos \varphi$		$I_{сн}$, А	$I_{с.х}$, А	r_c , Ом	x_c , Ом	$E_{р.н}$, В	$I_{р.н}$, А	r_p , Ом	x_p , Ом	Коэффициент трансформации напряжения k_e ($k_r = k_e^2$)		
				номинальный	холостого хода											
MTF011-6	1,7	850	2,0	0,72	0,166	5,9	4,9	5,78	3,6	126	12,0	0,77	0,566	9,06	0,085	51
MTF012-6	2,7	840	1,9	0,74	0,14	8,9	6,12	3,63	2,51	154	15	0,745	0,59	6,06	0,115	58
MTF111-6	4,1	870	1,9	0,79	0,108	11,7	7,45	2,1	1,93	175	18,7	0,6	0,57	4,65	0,195	76
MTF112-6	5,8	915	2,4	0,74	0,105	16	11,35	1,26	1,26	217	19,0	0,5	0,648	3,1	0,27	88
MTF211-6	9	915	2,1	0,74	0,085	24	14,35	0,755	1,05	273	25	0,485	0,855	1,92	0,46	120
MTF311-6	13	935	2,5	0,74	0,0925	34,5	23,2	0,48	0,645	184	51	0,111	0,241	4,2	0,9	170
MTF312-6	17,5	950	2,4	0,77	0,085	42,5	28,7	0,23	0,334	233	54	0,107	0,244	2,66	1,25	210
MTF311-8	9	680	2,0	0,74	0,108	25,6	17,7	0,835	0,843	264	26	0,46	0,643	2,07	1,1	170
MTF312-8	13	695	2,5	0,76	0,0805	34	24,2	0,365	0,53	178	53	0,122	0,182	4,54	1,55	210
MTF411-6	27	955	3,0	0,77	0,077	64	40	0,197	0,287	246	77	0,0763	0,236	2,37	2,0	280
MTF412-6	36	965	3,0	0,75	0,069	86	51,8	0,124	0,197	271	88	0,055	0,173	1,96	2,7	345
MTF411-8	18	700	2,5	0,73	0,083	46,7	29,8	0,327	0,53	221	59	0,117	0,26	2,94	2,15	280
MTF412-8	26	715	2,5	0,68	0,08	71	49,6	0,182	0,313	266	68	0,095	0,231	2,03	3,0	345

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1975 г.

Краново-металлургические двигатели асинхронные с короткозамкнутым ротором типа МТК, 380 В, ПВ=25%

Тип	$P_{\text{н}}$ кВт	$n_{\text{н}}$ об/мин	$\frac{M_{\text{м}}}{M_{\text{н}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$	Статор							
					$\frac{I_{\text{с.п}}}{I_{\text{с.н}}}$	$\cos \varphi$			$I_{\text{с.н}}$ А	$I_{\text{с.х}}$ А	$r_{\text{с}}$ Ом	$x_{\text{с}}$ Ом
						пуско- вой	номин- альный	холо- стого хода				
МТК-11-6	2,2	883	2,6	2,6	3,3	0,86	0,76	0,36	6,4	4,7	3,67	2,54
МТК-12-6	3,5	875	2,6	2,6	3,6	0,84	0,78	0,33	9,6	6,8	2,09	1,605
МТК-21-6	5,0	910	3,1	2,9	4,3	0,76	0,75	0,32	13,4	9,2	1,11	1,072
МТК-22-6	7,5	905	3,1	3,0	4,4	0,74	0,76	0,30	19,3	12	0,685	0,738
МТК-31-6	11,0	920	3,4	3,2	5,1	0,72	0,78	0,26	26,4	16,2	0,415	0,467
МТК-31-8	7,5	682	3,0	2,9	4,5	0,77	0,76	0,23	19,1	13,5	0,788	0,898
МТК-41-8	11,0	685	3,2	3,0	4,5	0,70	0,73	0,24	28,8	19,4	0,43	0,526
МТК-42-8	16,0	685	3,3	3,1	4,8	0,71	0,76	0,23	39,6	25,8	0,271	0,36
МТК-51-8	22,0	692	3,1	2,8	5,0	0,61	0,77	0,27	52,6	28,8	0,179	0,302
МТК-52-8	28,0	695	3,2	2,8	5,2	0,61	0,79	0,25	64,6	35,9	0,137	0,229

Тип	Ротор				Момент инерции ротора J , кг · м ²	Масса двигателя Q , кг
	Приведенный ток номинальный $I_{р. н}$, А	Приведенное активное сопротивление фазы r_p , Ом	Приведенное реактивное сопротивление фазы x_p , Ом	Коэффициент трансформации сопротивлений $k_r = k_e^2$		
МТК-11-6	4,2	5,02	2,88	$5,3 \cdot 10^4$	0,04	79
МТК-12-6	6,85	3,36	1,915	$2,35 \cdot 10^4$	0,0625	98
МТК-21-6	9,2	1,862	1,5	$1,92 \cdot 10^4$	0,0975	130
МТК-22-6	13,6	1,33	1,07	$1,005 \cdot 10^4$	0,138	153
МТК-31-6	19,2	0,824	0,708	$0,595 \cdot 10^4$	0,25	205
МТК-31-8	13,2	1,296	0,794	$1,087 \cdot 10^4$	0,25	205
МТК-41-8	19,5	0,84	0,662	$0,94 \cdot 10^4$	0,445	267
МТК-42-8	28,6	0,598	0,466	$0,46 \cdot 10^4$	0,65	332
МТК-51-8	38,4	0,383	0,390	$0,397 \cdot 10^4$	1,05	415
МТК-52-8	49,0	0,297	0,301	$0,234 \cdot 10^4$	1,38	490

Примечания: 1. Все двигатели имеют схему соединения фаз статора 380/220 В, Δ/Δ .

2. Роторная клетка выполнена из прямоугольных латунных стержней.

3. Активные сопротивления даны при 75°C.

4. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1954 г.

**Крановые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТК и МТКВ, 380 В, 50 Гц, ПВ=25%
(изоляция классов Е, В)**

Тип	$P_{н'}$ кВт	$n_{н'}$ об/мин	$\frac{M_{м}}{M_{н}}$	$\frac{M_{п}}{M_{н}}$	Статор							
					$\frac{I_{с.п}}{I_{с.н}}$	$\cos \varphi$			$I_{с.н'}$ А	$I_{с.х'}$ А	$r_{с'}$ Ом	$x_{с'}$ Ом
						пуско- вой	номи- нальный	холостого хода				
МТК011-6	1,4	870	2,8	2,8	3,0	0,86	0,69	0,15	4,8	3,2	5,98	3,93
МТК012-6	2,2	875	2,8	2,8	3,1	0,85	0,7	0,13	7,2	4,6	3,6	2,58
МТК111-6	3,5	870	2,8	2,8	3,5	0,85	0,74	0,11	10,1	6,1	2,16	2,03
МТК112-6	5,0	890	3,0	3,0	3,9	0,80	0,75	0,12	13,5	8,4	1,32	1,39
МТК211-6	7,5	905	2,9	2,8	4,3	0,72	0,79	0,09	18,4	11,0	0,68	1,07
МТКВ311-6	11	910	3,1	2,8	4,9	0,72	0,8	0,09	26	15,7	0,54	0,575
МТКВ311-8	7,5	680	3,1	2,9	4,4	0,76	0,74	0,09	20	13,2	0,88	0,965
МТКВ312-6	16	905	3,1	2,8	4,9	0,70	0,79	0,08	37,8	19,8	0,33	0,41
МТКВ312-8	11	690	3,3	3,1	4,6	0,77	0,71	0,10	30,4	21,3	0,53	0,56
МТКВ411-6	22	935	3,0	2,8	5,2	0,61	0,78	0,07	50	29,7	0,19	0,31
МТКВ411-8	16	695	3,3	3,0	4,8	0,66	0,73	0,08	41	28,2	0,285	0,43
МТКВ412-6	28	945	3,3	2,8	5,6	0,60	0,81	0,06	62	35,1	0,125	0,23
МТКВ412-8	22	695	3,3	3,0	5,0	0,65	0,76	0,07	53,2	35,8	0,207	0,32
МТКВ511-8	28	700	3,4	3,1	5,4	0,61	0,75	0,06	68	40	0,123	0,245
МТКВ512-8	37	705	3,6	3,3	5,8	0,61	0,72	0,06	91	55	0,08	0,17

Тип	Ротор				Момент инерции ротора J , кг · м ²	Масса двигателя Q , кг
	$I'_{р. н}$ приведенный, А	$r'_{ф. р}$ приведенное, Ом	$x'_{ф. р}$ приведенное, Ом	Коэффициент трансформации сопротивления $k_r = k_e^2$		
МТК011-6	2,9	8,41	3,80	$9,45 \cdot 10^4$	0,02	47
МТК012-6	4,5	5,70	2,63	$4,71 \cdot 10^4$	0,0275	53
МТК111-6	7	3,33	1,46	$3,02 \cdot 10^4$	0,0462	70
МТК112-6	9,2	2,34	1,015	$1,62 \cdot 10^4$	0,065	80
МТК211-6	13,6	1,62	1,05	$1,445 \cdot 10^4$	0,11	110
МТКВ311-6	19,5	0,73	0,64	$0,78 \cdot 10^4$	0,212	155
МТКВ311-8	13,7	1,17	0,70	$1,4 \cdot 10^4$	0,262	155
МТКВ312-6	28,6	0,52	0,47	$0,40 \cdot 10^4$	0,3	195
МТКВ312-8	19,6	0,725	0,44	$0,62 \cdot 10^4$	0,375	195
МТКВ411-6	37	0,355	0,375	$0,115 \cdot 10^4$	0,475	255
МТКВ411-8	27,8	0,505	0,42	$0,6 \cdot 10^4$	0,512	255
МТКВ412-6	48,2	0,265	0,28	$0,065 \cdot 10^4$	0,637	315
МТКВ412-8	38	0,37	0,32	$0,335 \cdot 10^4$	0,712	315
МТКВ511-8	49,1	0,27	0,235	$0,284 \cdot 10^4$	0,975	330
МТКВ512-8	63	0,19	0,16	$0,15 \cdot 10^4$	1,32	470

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1964 г.

Металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТКМ, 380 В, 50 Гц, ПВ=40%
(изоляция классов F; H)

Тип	$P_{\text{н}}$ кВт	$n_{\text{н}}$ об/мин	$\frac{M_{\text{м}}}{M_{\text{н}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$	Статор							
					$\frac{I_{\text{с.п}}}{I_{\text{с.н}}}$	$\cos \varphi$			$I_{\text{с.н}}$ А	$I_{\text{с.х}}$ А	$r_{\text{с}}$ Ом	$x_{\text{с}}$ Ом
						пуско- вой	номи- нальный	холостого хода				
МТКМ111-6	2,2	895	2,6	2,6	3,8	0,88	0,78	0,13	6,3	4,25	4,33	2,61
МТКМ112-6	3,3	905	2,6	2,5	4,0	0,88	0,79	0,13	8,9	6,6	2,8	1,67
МТКМ211-6	5,0	920	3,1	2,9	4,7	0,78	0,8	0,10	12,5	7,8	1,41	1,29
МТКМ311-6	7,5	930	2,8	2,5	4,9	0,76	0,83	0,095	17,5	11,8	0,90	0,663
МТКМ311-8	5,0	695	2,9	2,6	4,5	0,84	0,76	0,12	13,3	9,4	1,76	1,24
МТКМ312-6	11,0	935	3,0	2,8	5,3	0,72	0,8	0,09	26,0	16	0,595	0,485
МТКМ312-8	7,5	695	3,0	2,8	4,6	0,81	0,76	0,105	19,8	13,3	1,04	0,833
МТКМ411-6	16	940	3,0	2,8	5,5	0,67	0,81	0,075	36,0	18	0,323	0,398
МТКМ411-8	11	700	3,4	3,1	5,2	0,7	0,74	0,085	28,0	18,6	0,465	0,543
МТКМ412-6	22	940	3,1	2,8	5,6	0,64	0,86	0,07	46,0	21,9	0,218	0,312
МТКМ412-8	16	705	3,4	3,1	5,2	0,7	0,73	0,08	41,5	27,2	0,316	0,371
МТКМ511-8	22	705	3,3	2,9	5,5	0,68	0,8	0,07	49,5	31	0,205	0,284
МТКМ512-8	28	705	3,5	3,1	6,0	0,65	0,75	0,07	67,0	40	0,141	0,214

Тип	Ротор				Момент инерции ротора J , кг · м ²	Масса двигателя Q , кг
	$i_{р. н}$ приведенный, А	$r_{ф. р}$ приведенное, Ом	$x_{ф. р}$ приведенное, Ом	Коэффициент трансформации сопротивления $k_r = k_e^2$		
МТКМ111-6	4,4	4,3	1,88	$3,88 \cdot 10^4$	0,0462	70
МТКМ112-6	6,7	2,78	1,17	$1,93 \cdot 10^4$	0,065	80
МТКМ211-6	9,3	2,0	0,74	$1,79 \cdot 10^4$	0,110	110
МТКМ311-6	13,6	0,86	0,75	$0,91 \cdot 10^4$	0,212	155
МТКМ311-8	9	1,5	0,9	$1,79 \cdot 10^4$	0,263	155
МТКМ312-6	19	0,62	0,56	$0,48 \cdot 10^4$	0,300	195
МТКМ312-8	13,7	1,04	0,63	$0,89 \cdot 10^4$	0,376	195
МТКМ411-6	28,2	0,45	0,47	$0,15 \cdot 10^4$	0,475	255
МТКМ411-8	19,2	0,65	0,54	$0,76 \cdot 10^4$	0,512	255
МТКМ412-6	38,2	0,36	0,38	$0,09 \cdot 10^4$	0,637	315
МТКМ412-8	28,3	0,44	0,37	$0,4 \cdot 10^4$	0,712	315
МТКМ511-8	37,6	0,32	0,27	$0,34 \cdot 10^4$	0,975	380
МТКМ512-8	47,6	0,24	0,20	$0,19 \cdot 10^4$	1,32	470

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1964 г.

Краново-металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТКФ, 380/220 В, ПВ=25%

Тип	$P_{н'}$ кВт	$n_{н'}$ об/мин	$\frac{M_M}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	Статор							
					$\frac{I_{с.п}}{I_{с.н}}$	пуско- вой	номи- нальный	холостого хода	$I_{с.н'}$ А	$I_{с.х'}$ А	$r_{с'}$ Ом	$x_{с'}$ Ом
МТКФ011-6	1,7	835	2,3	2,3	2,6	0,87	0,74	0,166	5,8	4,17	5,78	3,6
МТКФ012-6	2,7	835	2,2	2,2	2,7	0,85	0,77	0,14	8,2	5,3	3,63	2,51
МТКФ111-6	4,1	850	2,3	2,3	3,2	0,81	0,83	0,108	10,9	6,22	2,1	1,93
МТКФ112-6	5,8	870	2,3	2,3	3,4	0,81	0,8	0,105	15,5	9,6	1,26	1,26
МТКФ211-6	9	840	2,2	2,1	3,4	0,71	0,81	0,085	23,2	11,7	0,755	1,05
МТКФ311-6	13	895	2,9	2,8	9,0	0,715	0,8	0,0925	32,3	19,3	0,48	0,645
МТКФ312-6	17,5	915	3,2	3,1	5,0	0,72	0,82	0,085	40,5	29,8	0,23	0,334
МТКФ311-8	9	670	3,0	2,9	4,0	0,77	0,77	0,108	24	16,4	0,835	0,843
МТКФ312-8	13	690	3,0	2,8	4,7	0,735	0,79	0,0805	31,8	27,7	0,365	0,53
МТКФ411-6	27	915	2,6	2,4	4,5	0,622	0,83	0,077	61	31,3	0,197	0,287
МТКФ412-6	36	920	3,3	3,1	4,7	0,62	0,82	0,069	81	42,1	0,124	0,197
МТКФ411-8	18	680	2,4	2,3	4,1	0,649	0,77	0,083	45	25,4	0,327	0,53
МТКФ412-8	26	690	2,8	2,6	4,5	0,633	0,75	0,08	66	43,3	0,182	0,313

Тип	Ротор				Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
	$I'_{р. н}$ приведенный, А	$r'_{ф. р}$ приведенное, Ом	$x'_{ф. р}$ приведенное, Ом	Коэффициент трансформации сопротивления $k_r = k_e^2$		
MTKF011-6	12,76	7,45	3,17	$8,67 \cdot 10^4$	0,08	47
MTKF012-6	4,48	5,38	2,32	$4,6 \cdot 10^4$	0,11	53
MTKF111-6	6,55	3,26	0,165	$3,51 \cdot 10^4$	0,18	70
MTKF112-6	8,65	2,19	1,12	$1,8 \cdot 10^4$	0,26	80
MTKF211-6	14,2	1,62	1,02	$1,44 \cdot 10^4$	0,44	110
MTKF311-6	19,5	0,8	0,555	$0,74 \cdot 10^4$	0,85	155
MTKF312-6	26,2	0,477	0,356	$0,359 \cdot 10^4$	1,2	195
MTKF311-8	13,2	1,01	0,645	$1,335 \cdot 10^4$	1,1	155
MTKF312-8	19,1	0,64	0,42	$0,615 \cdot 10^4$	1,55	195
MTKF411-6	38,0	0,327	0,348	$0,319 \cdot 10^4$	1,9	255
MTKF412-6	51,8	0,236	0,251	$0,173 \cdot 10^4$	2,55	315
MTKF411-8	26,3	0,503	0,409	$0,596 \cdot 10^4$	2,15	255
MTKF412-8	38,0	0,325	0,278	$0,293 \cdot 10^4$	3,0	315

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1975 г.

Краново-металлургические асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа МТКН,
 380/220 В, 50 Гц, ПВ=25 %

Тип	$P_{н'}$ кВт	$n_{н'}$ об/мин	$\frac{M_{м}}{M_{н}}$	$\frac{M_{п}}{M_{н}}$	Статор							
					$\frac{I_{с.п}}{I_{с.н}}$	$\cos \varphi$			$I_{с.н'}$ А	$I_{с.х'}$ А	$r_{с'}$ Ом	$x_{с'}$ Ом
						пуско- вой	номинальный	холостого хода				
МТКН111-6	3,5	890	2,8	2,8	3,0	0,86	0,75	0,154	10,5	8,0	2,62	1,7
МТКН112-6	5,3	875	3,0	3,0	3,5	0,84	0,81	0,123	14	9,6	1,61	1,14
МТКН211-6	8,2	875	2,7	2,6	3,8	0,6	0,75	0,112	23,2	14,4	0,835	0,88
МТКН311-6	13	895	2,9	2,8	4,0	0,725	0,8	0,095	32,3	19,3	0,51	0,645
МТКН311-8	9	670	3,0	2,9	4,0	0,797	0,77	0,12	24	16,4	0,98	0,843
МТКН312-6	17,5	915	3,2	3,1	5,0	0,715	0,82	0,0916	40,5	30,3	0,337	0,431
МТКН312-8	13	690	3,0	2,8	4,7	0,764	0,79	0,106	31,8	27,7	0,534	0,529
МТКН411-6	27	915	2,6	2,4	4,5	0,651	0,83	0,08	61	30,8	0,219	0,271
МТКН411-8	18	680	2,4	2,3	4,1	0,672	0,77	0,086	45	25,5	0,352	0,507
МТКН412-6	36	920	3,3	3,1	4,7	0,62	0,82	0,071	81	41,5	0,133	0,197
МТКН412-8	26	690	2,8	2,6	4,5	0,655	0,75	0,084	66	43,3	0,202	0,313
МТКН511-8	34	680	2,3	2,3	4,3	0,51	0,82	0,07	79	38,8	0,164	0,232
МТКН512-8	45	680	2,5	2,4	4,4	0,5	0,81	0,08	104	45	0,103	0,172

Тип	Ротор				Момент инерции ротора J , кг·м ²	Масса двигателя Q , кг
	$I'_{р. н}$ приведенный, А	$r'_{ф. р}$ приведенный, А	$x'_{ф. р}$ приведенное, Ом	Коэффициент трансформации сопротивления $k_r = k_e^2$		
МТКН111-6	5,65	2,82	1,425	$3,03 \cdot 10^4$	0,18	70
МТКН112-6	7,7	2,19	1,12	$1,8 \cdot 10^4$	0,26	80
МТКН211-6	12,5	1,4	0,88	$1,25 \cdot 10^4$	0,44	110
МТКН311-6	19,5	0,8	0,555	$0,74 \cdot 10^4$	0,85	155
МТКН311-8	13,5	1,01	0,645	$1,335 \cdot 10^4$	1,1	155
МТКН312-6	26,4	0,478	0,356	$0,359 \cdot 10^4$	1,2	195
МТКН312-8	19,5	0,64	0,42	$0,615 \cdot 10^4$	1,55	195
МТКН411-6	37,7	0,328	0,346	$0,319 \cdot 10^4$	1,9	255
МТКН411-8	26,1	0,507	0,409	$0,597 \cdot 10^4$	2,15	255
МТКН412-6	51,4	0,236	0,25	$0,173 \cdot 10^4$	2,55	315
МТКН412-8	37,8	0,325	0,27	$0,293 \cdot 10^4$	3,0	315
МТКН511-8	48,0	0,307	0,464	$0,386 \cdot 10^4$	4,3	440
МТКН512-8	64,7	0,237	0,366	$0,226 \cdot 10^4$	5,7	540

Примечания: 1. Максимально допустимая частота вращения равна 2,5-кратной синхронной.

2. Сопротивления обмоток даны в нагретом состоянии.

3. Таблица составлена по материалам завода-изготовителя 1975 г.

Технические данные синхронных двигателей (разных)

Тип	U_H , кВ	P_H		$n_{с.}$, об/мин	$\cos \varphi_H$ опере- жаю- щий	$I_{с.н.}$, А	$I_{р.н.}$ при $\cos \varphi_H$, А	$I_{р.н.х.}$, А	$\frac{M}{M_H}$	Асинхронный пуск				Момент инер- ции ро- тора J , т·м²	Масса дви- гателя Q , т
		кВ·А	кВт							$\frac{I_{с.п.}}{I_{с.н.}}$	$\frac{M_{п.}}{M_H}$	$\frac{M_{вх.}}{M_H}$	$\cos \varphi_{п.}$		
ДСЗ-2121-16	10	17000	14070	275	0,85	983	561	350	2,1	6,1	0,545	1,88	0,1	50	110
МСЗ25-12/12	10	7000	5400	500	0,80	404	367	212	2,4	6,5	0,65	1,1	0,149	12,7	54
МСЗ25-12/12	6	8000	6150	500	0,80	770	408	211	1,85	5,8	0,7	1,29	0,151	15,7	56
МСЗ21-7/6	6	900	675	1000	0,80	86,5	278	139	2,0	5,5	1	0,8	0,281	0,135	5,7
МСЗ23-14/8	3	3850	3300	750	0,9	740	466	295	2,25	6	0,8	0,8	0,196	1,32	14
МСЗ21-6/6	3	850	640	1000	0,8	164	374	190	2,25	4,6	0,8	0,65	0,28	0,12	5,2

Продолжение прилож. 18

Тип	Число витков		Обмоточ- ный коэф- фициент статора $k_{об}$	Статор				Ротор		τ , мм	b , мм	δ , мм	δ_m , мм
	фазы статора w_c	одного полюса ротора w_p		$r_{с.}$ Ом	$x_{с*}$	x_{d*}	x_{q*}	$r_{р.}$ Ом	Реактивное сопротивление рассеяния полюсов x_{f*}				
ДСЗ-2121-16	72	44,5	0,945	0,0268	0,093	0,755	0,515	0,248	0,218	536	400	18	27
МСЗ25-12/12	126	54,5	0,89	0,0723	0,081	1,01	0,60	0,164	0,200	607	455	12	15,6
МСЗ25-12/12	72	54,5	0,918	0,024	0,095	1,135	0,675	0,164	0,221	607	455	12	15,6
МСЗ21-7/6	216	49,5	0,945	0,493	0,098	1,3	0,77	0,089	0,202	420	306	8	11,9
МСЗ23-14/8	45	45,5	0,945	0,052	0,092	0,88	0,54	0,0786	0,196	500	353	16,5	26,9
МСЗ21-6/6	135	43,5	0,88	0,141	0,115	1,205	0,73	0,062	0,24	420	306	10	13,9

Примечания: 1. Сопротивления даны при температуре 15°C.

2. Обозначения величин пояснены в § 4-5 и на рис. 4-8.

3. Таблица составлена по материалам заводов-изготовителей 1953 г.

1. Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. Л. — М., Госэнергоиздат, 1963. 772 с. с ил.
2. Башарин А. В. Расчет динамики и синтез нелинейных систем управления. Л. — М., Госэнергоиздат, 1960. 298 с. с ил.
3. Башарин А. В., Голубев Ф. Н., Кепперман В. Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. Л., «Энергия», 1964. 390 с. с ил.
4. Бельский Г. И., Брейтер М. Е. и др. Под ред. А. А. Рабиновича и М. М. Синайского. Электрическое оборудование кранов. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 400 с. с ил.
5. Вешеневский С. Н. Расчет сопротивлений для электродвигателей. ГОНТИ НКТП, 1938; Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей. М. — Л., Госэнергоиздат, 1954, 1955. 328 с. с ил.
6. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1969. 632 с. с ил.
7. Гейлер Л. Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. М., Машгиз, 1960. 585 с. с ил.
8. Голован А. Т. Основы электропривода. М. — Л., Госэнергоиздат, 1959. 344 с. с ил.
9. Дружинин Н. Н. Электрооборудование прокатных станов. М., Metallurgizdat, 1956. 456 с. с ил.
10. Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах постоянного тока. Л. — М., Госэнергоиздат, 1951. 189 с. с ил.
11. Касьянов В. Т. Реакция якоря машин постоянного тока. «Вестник электропромышленности», 1940, № 2, с. 9—14.
12. Морозов Д. П. Основы электропривода. М. — Л., Госэнергоиздат, 1950. 368 с. с ил.
13. Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л., «Энергия», 1975. 504 с. с ил.
14. Сандлер А. С. Электрооборудование производственных механизмов. М. — Л., Госэнергоиздат, 1958. 238 с. с ил.
15. Синайский М. М. Электрический привод затворов гидросооружений. М. — Л., Госэнергоиздат, 1956. 199 с. с ил.
16. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами. М. — Л., Госэнергоиздат, 1959. 528 с. с ил.
17. Слежановский О. В. Электропривод реверсивных станов горячей прокатки. М., Metallurgizdat, 1961. 444 с. с ил.
18. Соколов М. М. Электрооборудование общепромышленных механизмов. М., «Энергия», 1976. 488 с. с ил.

19. Хализев Г. П. Электропривод и основы управления. М. — Л., Госэнергоиздат, 1962. 384 с. с ил.

20. Целиков А. И. Механизмы прокатных станов. М., Машгиз, 1946. 271 с. с ил.

21. Челюсткин А. Б., Розенман Е. А. Автоматическое управление прокатными станами. М., Metallurgizdat, 1965. 614 с. с ил.

22. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. М., «Энергия», 1971. 432 с. с ил.

23. Шубенко В. А. Некоторые вопросы динамики автоматизированных асинхронных электроприводов. — «Электричество», 1960, № 1, с. 10—18.

24. Эфендизаде А. А. Теория регулирования асинхронного двигателя. Баку, Изд-во АН Азербайджанской ССР.

25. Вешеневский С. Н. Регулирование скорости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором изменением частоты. — «Электричество», 1966, № 8, с. 59—63.

26. Terrell Croft. Electricians Handbook. USA, 1948.

Предисловие редактора	3
Введение	4

Глава первая

ОБЩИЕ ОСНОВЫ

1-1. Динамика привода	7
1-2. Ограничение пиков тока и момента двигателей	20

Глава вторая

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2-1. Номинальное сопротивление	28
2-2. Внутренние сопротивления	29

А. Двигатели параллельного возбуждения

2-3. Естественные и искусственные характеристики	34
2-4. Пуск с полным потоком	38
2-5. Предварительные моменты	57
2-6. Ускорение и замедление двигателей изменением потока возбуждения	59
2-7. Противовключение	81
2-8. Динамическое торможение нерегулируемых двигателей	91
2-9. Динамическое торможение регулируемых двигателей	99
2-10. Регулирование частоты вращения двигателя резисторами в цепи якоря	107
2-11. Регулирование частоты вращения двигателя потоком возбуждения	119
2-12. Разрядные резисторы обмоток возбуждения	122

Б. Двигатели последовательного возбуждения

2-13. Естественные и искусственные характеристики	126
2-14. Пуск	133
2-15. Противовключение	139
2-16. Динамическое торможение	143
2-17. Регулирование частоты вращения	147
2-18. Реакция якоря в схемах шунтирования	154
2-19. Схемы управления двигателями последовательного возбуждения	161

В. Двигатели смешанного возбуждения

2-20. Естественные и искусственные характеристики	171
2-21. Пуск	174
2-22. Противовключение	176

2-23. Динамическое торможение	176
2-24. Сравнение динамического торможения с противовключением	179
2-25. Регулирование частоты вращения	181

Глава третья

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3-1. Номинальное сопротивление	182
3-2. Внутренние сопротивления	184

А. Двигатели с фазным ротором

3-3. Естественные и искусственные характеристики	188
3-4. Пуск с симметричными сопротивлениями ступеней резистора в роторе	204
3-5. Пуск с несимметричными сопротивлениями ступеней резистора в роторе	218
3-6. Пуск с реакторами в роторе	226
3-7. Противовключение	232
3-8. Динамическое торможение	235
3-9. Регулирование частоты вращения	255
3-10. Регулирование скольжения двигателей в приводах с маховиком	261

Б. Двигатели с короткозамкнутым ротором

3-11. Естественные и искусственные характеристики	274
3-12. Пуск с симметричными сопротивлениями секций резистора в статоре	279
3-13. Пуск с несимметричными сопротивлениями секций резистора в статоре	287
3-14. Динамическое торможение	296
3-15. Регулирование частоты вращения	298
3-16. Частотное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	301

Глава четвертая

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

4-1. Номинальное сопротивление	311
4-2. Естественные характеристики	311
4-3. Пуск	316
4-4. Разрядный резистор	320
4-5. Динамическое торможение	324

Глава пятая

РЕЗИСТОРЫ

5-1. Основы теории нагрева	338
5-2. Эквивалентные продолжительные токи	341
5-3. Выбор резисторов и составление схем	357
Приложения	382
Список литературы	428

СТАНИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ ВЕШЕНЕВСКИЙ

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ
В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

Редактор *А. П. Ващенко*

Редактор издательства *И. В. Антик*

Переплет художника *В. И. Карпова*

Художественный редактор *Т. Н. Хромова*

Технический редактор *Г. Г. Самсонова*

Корректор *З. Б. Драновская*

ИБ № 1217

Сдано в набор 24/VI 1976 г. Подписано к печати 31/I 1977 г.
Т-03442. Формат 84×108^{1/32}. Бумага типографская № 2:
Усл. печ. л. 22,68. Уч.-изд. л. 24,19. Тираж 40 000 экз.
Зак. 726. Цена 1 р. 47 к.

Издательство «Энергия», Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.